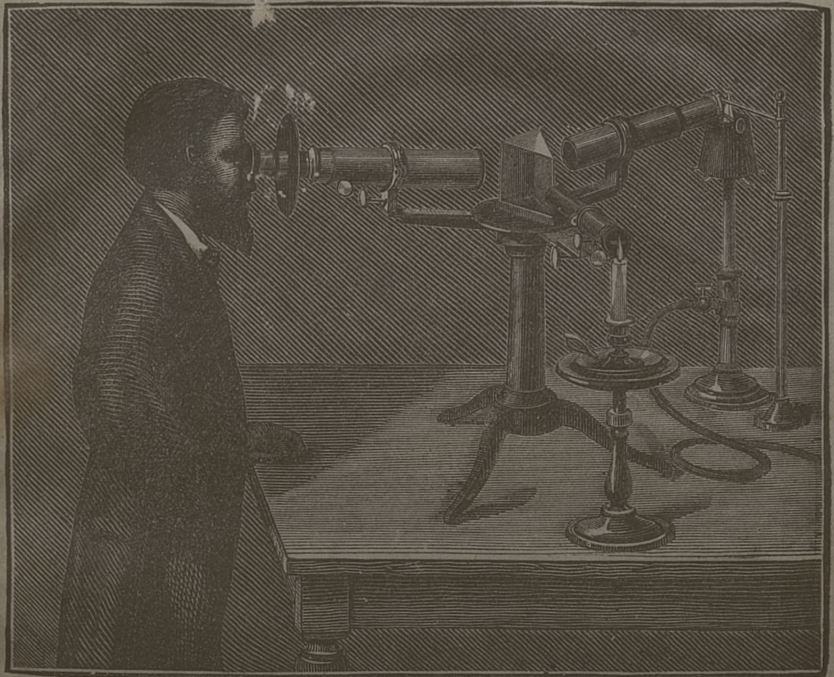
Cena 20 kop. **Zeszyt 13.** Cena 20 kop.

SIŁY PRZYRODY.

POPULARNY WYKŁAD FIZYKI

I GŁÓWNIEJSZYCH JEJ ZASTOSOWAŃ.



Spektroskop.

Podług dzieła A. Guillemin'a „Le monde physique"

OPRACOWALI

Józefowa Nusbaum

bak. n. prz.

i

Henryk Silberstein

dr. fil., b. as. chem. przy un. w Bernie.

WARSZAWA.

Nakładem Księgarni **H. Oławskiego**, ul. Mazowiecka № 6.

1889.

krtani i tchawicy. Figura 243 przedstawia część krtani i część tchawicy (w pionowym przekroju), widzianych z tyłu: *a*—przekrój chrząstki pierścieniowej, *b*—chrząstki tarczowej, *c*—dolnych strun głosowych, *d*—górnych strun głosowych, *e*—ventriculi Morgagni.

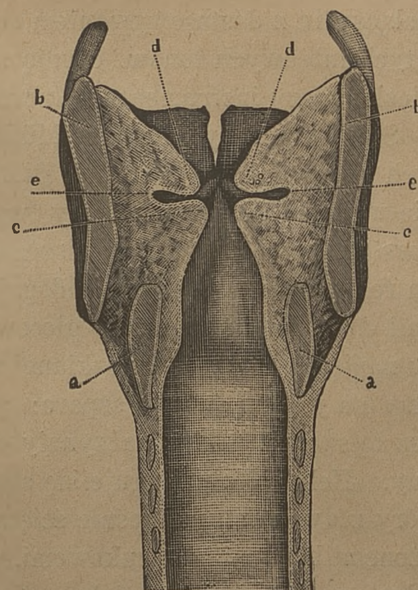


Fig. 243. Pionowy przekrój krtani i części tchawicy.

Przy zwykłem oddychaniu głośnia jest znacznie rozszerzona (figura 244) i przepływający przez nią prąd powietrza nie wytwarza żadnego dźwięku, podczas mówienia natomiast albo śpiewania struny głosowe odpowiednio się naprężają, szpara zaś pomiędzy niemi się zwęża (fig. 245) i wchodzące przez nią powietrze wprawia struny w drgania. Peryod tych drgań, a więc i wysokość tonu zmienia się wraz ze stopniem naprężenia strun; bardzo wielką rolę odgrywa tu także, jak to po-

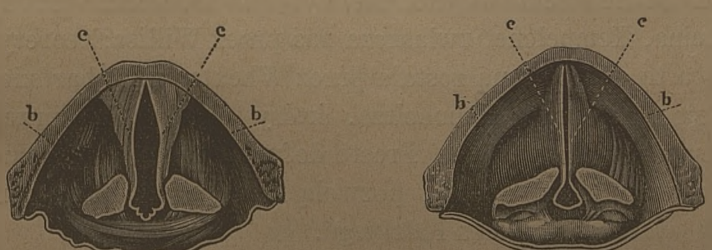


Fig. 244 i 245. Poprzeczny przekrój krtani, widzianej z góry: podczas oddychania (244) i śpiewu (245).

niżej wyłuszczymy, rezonans jamy ustnej, który, wzmacniając te lub owe tony strun, warunkuje koloryt głosu. Gladkość i mięk-

kość głosu pochodzi ztąd, że podczas drgań, głośnia, wskutek zachodzenia na siebie strun głosowych, w równomiernych odstępach czasu zamyka się. Szybkość i dokładność, z jaką struny głosowe zmieniają swe naprężenie oraz kształt i wielkość szpary, w połączeniu z dostosowywaniem się jamy ustnej dla wzmocnienia tych lub owych tonów, czynią z organu głosowego człowieka najdoskonalszy instrument muzyczny.

Sławny uczony Johannes Müller, opierając się na pracach swych poprzedników Ferraina, Biota i Cagnard-Latour'a, ostatecznie wykazał analogię między wytwarzaniem głosu w krtani i powstawaniem dźwięku w piszczałkach języczkowych, w których rolę języczka odgrywają drgające elastyczne błony. Naśladował on działalność strun głosowych: kauczukowe błony tak były napięte nad otworem szklanej rury, że pomiędzy niemi pozostawała jeszcze wązka szpara; przy przepychaniu powietrza przez tę szparę, błony zaczynały drgać i wydawać ton muzykalny. Helmholtz posługuje się stosowniejszą do tego celu rurą, u góry z dwóch stron skośnie ściętą i nakrytą dwiema słabo wyprężonemi błonami kauczukowemi, pozostawiającemi między sobą bardzo wązką szparę, od dołu zaś otwartą. Wysokość tonu, wydawanego przez taki przyrząd, zależy od stopnia naprężenia błon.

Tworzenie się samogłosek w organie głosowym człowieka oddawna stanowi ulubiony przedmiot badań dla wielu uczonych. Liczne doświadczenia wykonane były w tej mierze przez Kratzensteina, Kempelena, zwłaszcza zaś przez Willisa; teoretycznie kwestya ta opracowaną została przez Wheatstone'a, bardziej wyczerpująco zaś przez Helmholtza, który obrał ją za przedmiot wyczerpujących studyów. Proste doświadczenia, wykonane po raz pierwszy przez Willisa, pozwolą nam poznać przyczynę pewnych właściwości głosu ludzkiego.

Weźmy stosowny języczek, nie połączony z czarą głosową (porównaj np. fig. 217, str. 320) i wdymajmy za pomocą miechów do nóżki powietrze, a otrzymamy głośny i ostry dźwięk. Połączmy teraz z języczkiem ostrokręgowo ku górze rozszerzającą się czarę głosową,—wówczas koloryt dźwięku się zmieni

i jeżeli będziemy przesuwali dłoń wpoprzek wylotu czary, to otrzymamy dźwięk bardzo podobny do głosu ludzkiego. Zakryjmy np. zupełnie wylot czary dłonią i następnie podnieśmy szybko tę ostatnią dwa razy do góry, a usłyszymy wyraz „mama,“ jakby wymawiany przez dziecko. Użyjmy do doświadczenia krótszej niż poprzednia czary, a usłyszymy rzeczony wyraz tak, jak gdyby wymówiony przez dziecko o zatkanych nozdrzach. Łącząc więc z drgającym języczkiem odpowiednią piszczałkę (czarę głosową), możemy dźwiękom jego nadać właściwości głosu ludzkiego.

Otóż w organie głosowym człowieka rolę języczka odgrywają struny głosowe, rolę zaś czary—jama ustna, której kształt możemy dowolnie zmieniać tak, że wzmacnia ona ton zasadniczy albo niektóre przytony strun głosowych; rozmaitym też kombinacyom tych tonów różnej wysokości i natężenia należy przypisać różnice w brzmieniu samogłosek. Możemy się o tem przekonać za pomocą następujących doświadczeń: Trzymajmy przed otworem ust drgający kamerton, nastrojony na ton *f* i zmieniajmy układ jamy ustnej dopóty, dopóki nie zacznie ona silnie odbrzmiewać na ton stroika; po osiągnięciu tego, usuńmy na stronę kamerton i, nie zmieniając w niczem kształtu jamy ustnej, wydychajmy powietrze z płuc przez głośnię: usłyszymy wówczas samogłoskę „u,“ a nie żadną inną. Przy wymawianiu „u“ jama ustna jest więc nastrojona na ton *f*. W podobny sposób daje się wykazać, jak tego pierwszy dowiódł Donders, że przy wymawianiu „o“ jama ustna nastrojona jest na ton b', przy „a“—na ton b'' aż do d''' i t. d., przyczem same struny głosowe mogą we wszystkich tych wypadkach być nastrojone na ten sam ton zasadniczy.

Analizę dźwięków samogłoskowych możemy wykonać za pomocą przyrządu Koeniga, opisanego na str. 364: gdy w pobliżu rezonatorów wymawiamy daną samogłoskę, wtedy niektóre z nich odbrzmiewają i widzimy, że pewne smugi świetlne w obracającem się zwierciedle są mniej lub więcej wyraźnie zazębione, inne zaś—nie. Z drugiej strony Helmholtz zdołał, za pomocą przyrządu, przedstawionego na fig. 240, str. 372, sztucznie od-

tworzyć różne samogłoski przez stosowne kombinacye tonów stroików.

Jednakże wypada nadmienić, że kwestya powstawania dźwięków samogłoskowych bynajmniej jeszcze nie jest ostatecznie załatwiona i nie przestała być przedmiotem badań teoretycznych, jakoteż doświadczalnych dla wielu fizyków i fizyologów. Co się tyczy spółgłosek, to powstają one wskutek hałasów, wytwarzanych przez wargi, zęby, język i t. d. i towarzyszących początkowi oraz końcowi dźwięków samogłoskowych. Hałasy te są o wiele mniej intensywne, niż tony dające początek samogłoskom, wskutek czego pierwsze cichną już na takiej odległości od mówiącego, przy której samogłoski doskonale jeszcze słyszymy. Z tego wynika, że przy mówieniu do osób o słabym słuchu, niekonieczne jest podnoszenie głosu, wystarcza już dobitnie i wyraźnie wymawiać spółgłoski.

§ 3. Ucho.

Na zakończenie niniejszej księgi musimy jeszcze rozważyć ów misternie zbudowany organ, za pośrednictwem którego odbieramy wrażenia słuchowe. Organ ten u człowieka składa się z ucha zewnętrznego, środkowego i wewnętrznego. Pierwsze utworzone jest z konchy usznej i zewnętrznego przewodu słuchowego, zamkniętego przez błonę, drugie stanowi jamę, komunikującą bezpośrednio z jamą gardzielową, a więc z zewnętrznem powietrzem; nareszcie ucho wewnętrzne tworzy również oddzielną jamę, wypełnioną wodnistą cieczą, w której znajdują się zakończenia nerwu słuchowego.

Koncha uszna (fig. 246) *A* służy do zbierania fal dźwiękowych i przenoszenia ich wzdłuż *zewnętrznego przewodu słuchowego B* na zamykającą takowy *błonę bębenkową C*, która oddziela ucho zewnętrzne od środkowego. Błona ta, dzięki bardzo kunsztownemu urządzeniu, może przejmować najrozmaitsze drgania dźwiękowe, zachodzące w otoczeniu, podobnie jak to czyni błona w fonautografie (patrz fig. 239, str. 366) i za pomocą nader delikatnego przyrządu przenosi je na ciecz, zawartą

w uchu wewnętrznem. Przyrząd ten, umieszczony w środkowej części ucha, t. zw. *jamie bębenkowej*, składa się z trzech kosteczek, przypominających z postaci swej *młotek*, *kowadło* i *strzemię*.

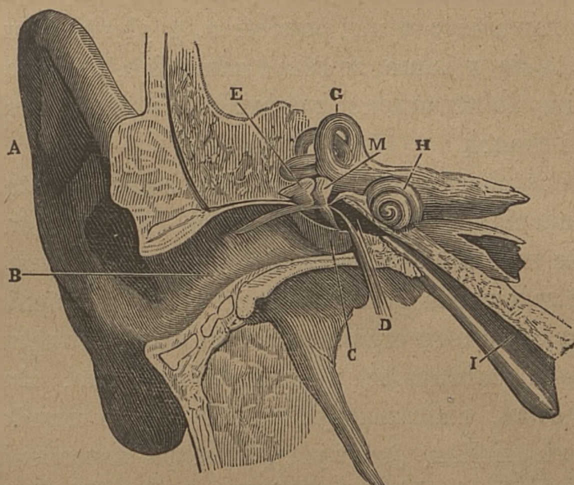


Fig. 246. Wnętrze organu słuchowego.

Drgania błony bębenkowej udzielają się przylegającemu do niej trzonkowi młotka *M*, który główką swą, wchodzącą w panewkę kowadła *E*, wprawia takowe w ruch oscylacyjny. Kowadło posiada dość długi wyrostek, połączony stawowo z główką strzemienia *L* (fig. 247), którego stopa *K* przylega do błonki, rozpiętej wpoprzek niewielkiego otworu, zwanego *okienkiem owalnem*, prowadzącego do wewnętrznego ucha. Mechanizm rzeczonych kosteczek jest dźwigniowy i sprawia, że ruchy strzemienia są silniejsze, aniżeli powodujące je drgania błony bębenkowej. Oprócz tych kosteczek w przestrzeni, zawartej pomiędzy uchem zewnętrznem i wewnętrznem, znajdują się jeszcze mięśnie, służące

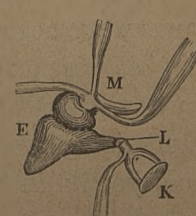


Fig. 247. Układ kosteczek w jamie bębenkowej.

do większego lub mniejszego naprężania błony bębenkowej i do ochraniania jej od zbyt gwałtownych wstrząśnień. Przestrzeń ta łączy się nadto za pomocą wązkiego kanaliku *I—rurki Eustachego* z jamą gardzielową; głównem przeznaczeniem tego kanaliku jest odprowadzanie możliwych wydzielin z jamy bębenkowej i odmienianie zawartego w niej powietrza, gdyby bowiem to ostatnie znajdowało się w jamie zewsząd zamkniętej, wówczas uległoby wessaniu, do utworzonej zaś przez to próżni wysiękałyby soki ze krwi i tkanek.

Opisane dotychczas części organu słuchowego służą, jak się zdaje, do wzmacniania drgań dźwiękowych, za czem przemawia okoliczność, że utrata błony bębenkowej i wyżej wymienionych kosteczek nie sprowadza głuchoty, lecz tylko osłabienie słuchu. Najważniejszą część tego organu stanowi ucho wewnętrzne, t. z *labirynt.* Jestto dziwacznie ukształtowana jama, zbudowana z błoniastych ścian, umieszczonych wśród bardzo twardej tkanki kostnej. Powiedzieliśmy już wyżej, że stopa strzemienia bezpośrednio przylega do błonki, zamykającej owalne okienko wewnętrznej jamy ucha. Otóż drgania dźwiękowe, zachodzące w otaczającem powietrzu, przenoszą się za pośrednictwem błony bębenkowej, młotka, kowadła i strzemienia na ostatnio wymienioną błonkę i wprawiają ciecz wodnistą, wypełniającą labirynt, w ruch falisty, odpowiadający pierwotnym drganiom. Ciecz ta, jako ciało trudno ściśliwe, będąc zamknięta w mocnych ścianach ucha wewnętrznego, paraliżowałaby jednak ruch stopy strzemienia, a więc także wszystkie poprzedzające ruchy, gdyby ucho wewnętrzne nie posiadało jeszcze drugiego—*okrągłego okienka*, zamkniętego podatną błonką, która mniej lub więcej ustępując naciskowi falującej cieczy wodnistej, pozwala swobodnie rozegrywać się ruchom kosteczek i wytwarzać fale cieczy, zawartej w labiryncie.

Labirynt składa się z 3 komunikujących z sobą części: ze środkowej, stanowiącej t. zw. *przedsionek* do dwu części skrajnych, z których jedna tworzy 3 *półkuliste kanały* (fig. 246 *G*), druga zaś przedstawia kanał, zwinięty w postaci *ślimaka H.* Przekrój ślimaka przedstawiony jest oddzielnie na fig. 248.

Falowania wodnistej cieczy, zawartej w labiryncie—zachodzące pod wpływem oscylacyj błonki, która zakrywa owalne okienko—przenoszą się na delikatne zakończenia nerwu słuchowego, wnikające do wnętrza kanałów półkulistych, przedsionka, najwięcej zaś do wnętrza ślimaka. Przenoszenie to nie dokonywa się jednak bezpośrednio. W pewnem mianowicie miejscu labiryntu wyrastają pomiędzy włóknami nerwowemi nader delikatne, ostro zakończone *włóski*—odkryte przez Maksa Schultzego—doskonale się nadające do współdrgania z oscylacyami cieczy. Będąc wprawione w drgania przez ciecz, włoski te pobudzają leżące pomiędzy ich korzeniami włókienka nerwowe, a za ich pośrednictwem odnośne ośrodki mózgowe, wywołując w tych ostatnich pewne zmiany, którym towarzyszy wrażenie dźwięku. W innem znowu miejscu labiryntu znajdują się małe utwory krystaliczne, zwane *otolitami* czyli *kamykami słuchowemi*, które podczas drgania wywierają przerywane ciśnienie na sąsiednie włókienka nerwowe i pobudzają je jak wyżej. Kamyki te służą prawdopodobnie do innego celu, niż rzeczone włoski słuchowe: podczas gdy pierwsze, z powodu swego ciężaru, nadają się głównie do przenoszenia najlżejszych szmerów oraz do przejmowania szybko przemijających tonów, których bez ich pomocy nie moglibyśmy, jak się zdaje, wcale odczuć, to przeciwnie włoski słuchowe, wskutek swej lekkości, wydają się być najwłaściwszemi pośrednikami do przenoszenia brzmień głośniejszych i ciągłych. Jeszcze ważniejszą, zdaje się, rolę w przenoszeniu falowań rzeczonej cieczy na zakończenia nerwu słuchowego odgrywa nader misternie zbudowany *organ Corti'ego* (zwany tak od imienia odkrywcy), umieszczony we wnętrzu ślimaka. Organ ten utworzony z oddzielnych włókienek, których liczba według Koellikera wynosi około 3000, przedstawia jakby instrument muzyczny, coś w rodzaju harfy, której oddzielne struny (włókienka) są tak naprężone, że z łatwością mogą przejmować oscylacye

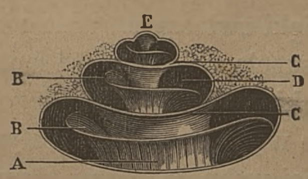


Fig. 248. Przekrój ślimaka.

o najrozmaitszym peryodzie drgania i przenosić je na przebiegające ten organ włókna nerwowe. Od tysięcy więc lat, powiada Tyndall, w uchu wewnętrznem człowieka istniała już ta harfa o 3000 strunach i bez naszej wiedzy i udziału przejmowała muzykę otaczającego nas świata, aby ją w odpowiedni sposób przygotować dla mózgu. Każde bowiem drganie dźwiękowe, padające na ten organ, wybiera sobie z pomiędzy jego odrębnie nastrojonych włókienek te, które mogą z niem współdrgać i wprawia je w oscylacye. Dzięki temu kunsztownemu urządzeniu, ucho nasze samo analizuje każdy, chociażby najbardziej złożony, dźwięk, rozkładając go na ton zasadniczy oraz tony górne i udostępnia nam w ten sposób całe bogactwo świata tonów ([1]).

Jakkolwiek nie udało się jeszcze dostatecznie wyjaśnić wielu punktów procesu słyszenia i rozróżniania dźwięków, to jednak w ostatnich dziesiątkach lat gałęź ta wiedzy ludzkiej, dzięki zwłaszcza gruntownym badaniom Helmholtza, znakomicie posunęła się naprzód i można się spodziewać, że bezustanne poszukiwania fizyków i fizyologów zdołają usunąć pozostałe jeszcze wątpliwości. W całym wszakże procesie słyszenia najbardziej wzbudza nasz podziw owa nieskończona zda się różnorodność wrażeń, do jakich zdolne jest ucho. Dzięki właśnie tej okoliczności, że zmysł słuchu umożliwia odczuwanie najsubtelniejszych odcieni dźwięków, zyskuje on wespół z organem głosowym ową wielką doniosłość dla całego życia umysłowego ludzi, staje się pośrednikiem przy wymianie ich myśli i uczuć.

([1]) Bliższe szczegóły, dotyczące organu słuchu, czytelnik może znaleźć w przystępnem i zajmującem dziełku d-ra Henryka Nusbauma „O wrażeniach zmysłowych."

KSIĘGA TRZECIA.

Ś W I A T Ł O.

ROZDZIAŁ I.

Światło w przyrodzie.

§ 1. Zjawiska ogólne.

Podczas gdy państwo dźwięku dostarcza naszemu duchowemu życiu koniecznych wrażeń słuchowych, gdy daje człowiekowi najlepsze środki do uzewnętrzniania myśli jego i uczuć, światło pozwala nam widzieć całą piękność i przepych otaczającej przyrody i—co ważniejsze—stanowi niezbędny warunek życia, zarówno naszego, jak i w ogóle całego organizowanego świata. Roślina zwraca się do słońca i rozwija pod jego dobroczynnym wpływem, w ciemności zaś zanika stopniowo; my sami czujemy budzącego się ducha po przejściu nocy i pojawieniu się światła dziennego.

Światło dnia, wywołujące tak różnorodne zjawiska, pochodzi wprawdzie z jedynego tylko, lecz niezmiernie potężnego źródła. Oko nasze nie może znieść bezpośredniego jego działania, oślepione odwraca się od słońca, nie zasłoniętego przez chmurę; nawet części nieba, najbliżej słońca leżące, wysyłają do nas zbyt jeszcze wielką ilość światła, ażebyśmy mogli bezkarnie spoglądać na nie gołem okiem. Zupełnie inaczej rzeczy się mają, gdy światło słoneczne pada najprzód na ciała nas otaczające i dopiero

po odbiciu się od nich wchodzi do naszego oka: nietylko że traci ona przez to tak wiele ze swego natężenia, iż nie obraża już naszego zmysłu wzroku, ale ulega jeszcze innej, bardzo zadziwiającej i ważnej zmianie. Mianowicie bezpośrednie światło słoneczne jest pozornie proste czyli jednorodne, posiada bowiem tylko jednę barwę; w razie zaś, gdy ulega odbiciu od rozmaitych ciał, przedstawia tak wielką mnogość odcieni i taką rozmaitość barw, jakiej zaledwie moglibyśmy się spodziewać. Jesteśmy tak przyzwyczajeni do tej zmiany, że w ogóle nie zwracamy na nią uwagi; zdaje się nam, iż każde ciało posiada samo przez się swą barwę, zwykle też sądzimy, że jakiekolwiekbądź źródło światła tylko ujawnia dla nas tę swoistą własność ciał. Zobaczymy jednak, że barwa tych ostatnich zależy jedynie od sposobu, w jaki odbijają one lub przepuszczają padające na nie światło. Światło i barwy wywierają na oko nasze właściwy im czar tak, że nawet niektórzy z malarzy popełnili błąd, nadając w swych obrazach zbyt wielką wagę świetności barw i zaniedbując przytem sam rysunek, podobnie jak to ma miejsce w nowoczesnej muzyce, gdzie świetność tonu bierze niekiedy górę nad jasnością melodyi. Wszakże gdy chcemy napawać się pięknością barw, nie mamy zaiste potrzeby udawać się do muzeów i podziwiać tam obrazy Rembrandta, Lorrain'a i innych mistrzów pędzla, albowiem w naturze samej istnieją tego rodzaju skarby, na które należy tylko umieć patrzeć. Promień słoneczny, załamany przy przejściu przez wodę, czerwień porannego i wieczornego nieba, błyszczące krople rosy na trawie, wspaniałe barwy bańki mydlanej oraz wiele innych podobnych zjawisk mogą z jednej strony posłużyć malarzowi jako odpowiednie wzory, z drugiej zaś stanowią dla myślącego człowieka potężną pobudkę do badania tajemnic natury. Cóż dziwnego, że w obec tych czarów, pierwotne ludy w swej naiwnej nieświadomości powzięły najgłębszą cześć dla słońca, od którego otrzymują największe dobrodziejstwo, a mianowicie światło i ciepło, że uważały je za wyższą istotę i czciły jako wszechwładne bóstwo świata. Z mniejszą czcią, lecz z większem za to zrozumieniem nauka obserwowała zjawiska świetlne, a przez subtelne i pilne badania udało się jej wy-

kryć prawa tych zjawisk. Zanim przystąpimy do opisu rzeczonych praw, postarajmy się poznać najprzód najważniejsze źródła światła.

§ 2. Źródła światła.

Źródła światła można, pod względem ich rozmieszczenia, podzielić na dwie grupy: jedna obejmuje te, które znajdują się zdala od ziemi w przestworach wszechświata, druga zaś—źródła bardziej dostępne dla nas, mieszczące się na powierzchni naszej planety lub w jej atmosferycznej powłoce. Do pierwszej należy słońce, którego blask, według Wollastona, przewyższa 800,000 razy blask księżyca w pełni. Jeżeli porównamy natężenie światła słonecznego ze światłem, wysyłanem do nas przez najjaśniejszą na niebie gwiazdę stałą— Syryusza – wynoszącem tylko $^1/_{7000}$ część światła księżycowego, to dojdziemy do wniosku, że potrzebaby było 5600 milionów takich gwiazd, ażeby dostarczyć ziemi tej ilości światła, jaką obecnie od słońca otrzymuje.

Wskutek obrotu ziemi około osi i około słońca, natężenie światła słonecznego w różnych punktach na ziemi ulega peryodycznym zmianom w ciągu każdej doby i każdego roku. W ogóle natężenie światła słonecznego zależy od wysokości, na jakiej słońce znajduje się nad danym horyzontem, a fakt ten, znany nam dobrze z codziennego życia, zrozumiemy dopiero wtedy, gdy poznamy prawa, według jakich zmienia się natężenie światła. Obecność w powietrzu pary, pod postacią mgły lub chmury, wywiera wielki wpływ na natężenie dochodzącego nas światła słonecznego i znacznie je osłabia. Pomiędzy ciałami świecącemi na sklepieniu niebieskiem, niektóre wysyłają do nas nie własne światło, lecz zapożyczone od innych źródeł; księżyc naprzykład, tak żywo oświecający od czasu do czasu noce nasze, otrzymuje światło od słońca i pośrednio dopiero odbija promienie jego na ziemię. To samo stosuje się do wszystkich planet i ich satelitów. Przeciwnie tysiące gwiazd, błyszczące podczas jasnych nocy na niebie, wysyła do nas, podobnie jak słońce, swe własne światło, które przybywa na ziemię znacznie osłabione z powodu olbrzy-

miej odległości, jaką przebiega. Również i mgławice, a po części także i komety, stanowią istotne źródła światła.

Zobaczymy w księdze o cieple, że każde ciało, ogrzane do dostatecznie wysokiej temperatury, nabiera zdolności świecenia i może stać się samodzielnem źródłem światła. Otóż właśnie słońce i gwiazdy stałe posiadają bez wątpienia niezmiernie wysoką temperaturę i znajdują się w stanie silnego rozżarzenia. Źródła światła, znajdujące się na powierzchni ziemi albo w jej atmosferze, można podzielić na naturalne i sztuczne. Do pierwszych należy błyskawica, ogień przy wybuchu wulkanicznym, zorze północne, pojawiające się tak często w okolicach biegunowych, wreszcie meteory i kule ogniste. Można tutaj zaliczyć także światło, pochodzące z niektórych istot żyjących, jak np. robaczków świętojańskich i wielu morskich zwierząt, oraz niektórych roślin; wreszcie pewne minerały, a także gnijące materye organiczne, również należą do tej kategoryi naturalnie świecących ciał.

Co do źródeł światła, sztucznie przez człowieka wytwarzanych, to wszystkie one polegają na tem, że pewne ciała zostają doprowadzane do mniej lub więcej wysokiej temperatury, przyczem albo szybko się spalają, albo też dłużej żarzą się tylko. Naprzykład płomień zwykłego gazu, oświetlającego nasze miasta i domy, powstaje przez to, że cząstki głównego jego składnika, utworzone z węgla i wodoru, będąc silnie ogrzane, spalają się czyli łączą z tlenem powietrza; częściowo także cząstki te rozkładają się na swoje elementy, przyczem węgiel wydziela się pod postacią niezmiernie delikatnego pyłku, unoszącego się wśród płomienia. Stałe cząstki tego pyłku węglowego zostają silnie rozżarzone i im też płomień gazowy, sam przez się słabo świecący, zawdzięcza swe żywe światło. Płomienie świec i lamp nie różnią się zasadniczo od płomienia zwykłego gazu, w nich bowiem także spala się pewne połączenie węgla i wodoru, one również zawdzięczają swe światło głównie znajdującym się w ich wnętrzu rozżarzonym cząstkom węgla. Jeżeli do płomienia słabo świecącego, lecz mającego bardzo wysoką temperaturę (w księdze o cieple zobaczymy, że płomień taki można otrzymać przez

silny dopływ tlenu) wprowadzimy naprzykład drut żelazny, to metal ten spali się i stopi, dając przytem wspaniałe iskry. Jeżeli natomiast do takiego bardzo gorącego płomienia wprowadzimy ciało niepalne i nietopliwe, naprzykład wapień, wtedy rozżarza się ono nadzwyczaj silnie i daje olśniewające światło, które—od jego wynalazcy—nazywamy światłem Drummonda. Najpotężniejsze wszakże sztuczne światło, dające się nawet porównać do światła słonecznego, otrzymuje się, gdy prąd elektryczny przebiega pomiędzy dwoma stosownie przygotowanemi węglami: W przerwie, oddzielającej te ostatnie, zjawia się świetlny łuk, utworzony przez niezmiernie drobne pyłki węglowe, które odrywają się od jednego z węgli i które, wskutek tego że przeprowadzają prąd elektryczny, znajdują się w stanie bardzo silnego rozżarzenia. W księdze, traktującej o elektryczności, pomówimy obszerniej o tym przedmiocie.

ROZDZIAŁ II.

Rozprzestrzenianie się światła w środkach jednorodnych.

§ 1. Prostolinijne rozprzestrzenianie się światła.

Gdy światło pada na przedmiot, sam przez się ciemny, wtedy zwykle zostaje ono przezeń odbite, przyczem ulega pewnej modyfikacyi, przedmiot zaś staje się źródłem światła zapożyczonego. Wiele jednak ciał przepuszcza w mniejszym lub większym stopniu padające na nie światło; powiadamy wtedy o nich, że są *przezroczyste*. Przezroczystość z jednej i nieprzezroczystość z drugiej strony nigdy jednak nie jest absolutna. Światło, przechodząc przez najbardziej nawet przezroczyste ciała, jak powietrze, woda, szkło, zostaje w części pochłonięte i to tem bardziej, im grubsza jest warstwa tego ciała. Po przez szklaną płytę lub warstwę wody nieznacznej grubości możemy zupełnie

dokładnie widzieć przedmioty, coraz mniej wyraźnie jednak w miarę wzrastającej grubości szkła lub wody. Jednocześnie samo ciało pochłaniające światło, z początku zupełnie bezbarwne, przybiera barwę coraz wyrazistszą i pełniejszą, aż w końcu, gdy światło zostaje całkowicie pochłonięte, widzimy już tylko to ciało, nie dostrzegamy zaś wcale przedmiotów, po za niem umieszczonych. W celu stwierdzenia tego na drodze doświadczalnej, Cialdi zanurzał w morzu, w blizkości brzegu Civita-Vechia, tam gdzie woda była nadzwyczajnie czysta, białą płytę i zauważył, że najwyżej na głębokości 45 metrów znikła ona dla oczu jego. „Biała barwa płyty z początku przeszła w zielonawą, następnie w czysty błękit, który stawał się stopniowo coraz ciemniejszy, w miarę większego pogłębiania przyrządu, aż wreszcie nie można było wcale odróżnić barwy płyty od barwy otaczającego środka.“ Płyty żółte lub mające kolor morskiego mułu, stawały się niewidzialne w tych samych warunkach już na głębokości 17 lub 24 metrów.

Przezroczystość gazów i bardzo czystego powietrza atmosferycznego jest o wiele większa tak, że stojąc podczas jasnej pogody na wysokiej górze, możemy napawać się bardzo rozległym widokiem i rozróżniać przedmioty, znajdujące się na znacznej od nas odległości. Według zdania Martins'a, możnaby, przy zupełnie przezroczystem powietrzu, objąć wzrokiem z wierzchołka góry Mont-Blanc koło, którego promień równałby się 210 kilometrom, możnaby więc dostrzedz jeszcze zatokę genueńską, lecz już na odległości większej niż 100 kilometrów przedmioty, z powodu par w powietrzu, wydają się jakby pokryte zasłoną, są niejasne i tylko na odległości 60 kilometrów można je wyraźnie rozróżnić.

Obok ciał, istotnie przezroczystych, są jeszcze takie, które wprawdzie przepuszczają światło, w zbyt jednak słabym stopniu, ażeby można było przez nie rozróżniać wyraźnie barwy i kontury przedmiotów; ciała takie nazywamy *przeświecającemi;* do nich należy szkło matowe, papier, róg, alabaster i niektóre ciecze, jak np. mleko. Papier, zmoczony lub nasycony oliwą, staje się bardziej przeświecający, a nawet—gdy jest dostatecznie cienki—przezroczysty. Podobnie znamy minerał—hydrofan—

który w stanie suchym nie przepuszcza światła, prześwieca zaś po wyjęciu go z wody, w której przeleżał przez pewien czas. Jeżeli z ciał, uchodzących za zupełnie nieprzezroczyste, np. z niektórych kamieni, drzew lub metali, przygotujemy sobie bardzo cienkie blaszki, to światło przejdzie przez nie, jakkolwiek w słabym tylko stopniu. Najbardziej zadziwiające pod tym względem jest złoto, które przez złotników może być doprowadzone do takiej cienkości, że 10000 blaszek tego metalu, ułożonych jedna na drugiej, tworzą razem warstwę grubości zaledwie

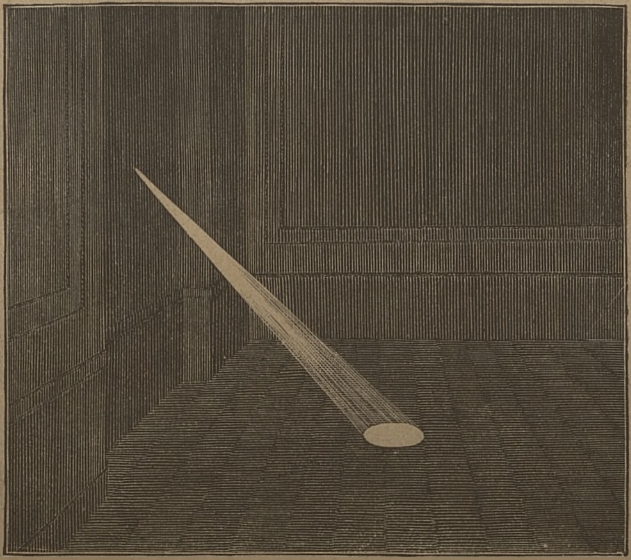


Fig. 249. Prostolinijne rozprzestrzenianie się światła.

jednego milimetra. Gdy na blaszkę taką będziemy patrzyli pod światło świecy, blaszka wyda się pięknego zielonego koloru, co dowodzi, że przepuszcza ona światło, przyczem to ostatnie nie przechodzi przez szczeliny, jakie ewentualnie w blaszce przy ubijaniu porobić się mogły, gdyż w takim razie nie przyjęłaby ona barwy odmiennej.

Zachodzi teraz pytanie, jaką drogę przebywa światło, gdy rozprzestrzenia się w danym środku? Rozpatrzmy najprzód wypadek, gdy środek ten jest jednorodny, w którym to razie bar-

dzo proste doświadczenia dadzą nam odpowiedź na powyższe pytanie. Gdy pomiędzy płomieniem świecy a okiem umieścimy szereg nieprzezroczystych ekranów, z których każdy posiada niewielki otwór, wtedy zobaczymy płomień tylko w tym razie, gdy wszystkie otwory znajdują się na jednej prostej linii z okiem i płomieniem. Przez długą i zgiętą rurę światło przechodzi tylko wtedy, gdy zgięcia są tak małe, że można od jednego końca rury do drugiego poprowadzić linię prostą, nie dotykając przytem ścian rury. Wreszcie, gdy znajdujemy się w ciemnym, ze



Fig. 250. Prostolinijny kierunek promieni słonecznych.

wszech stron zamkniętym pokoju, do którego światło słoneczne przenika tylko przez mały otwór w okiennicy, wtedy spostrzegamy, iż rozprzestrzenia się ono pod postacią stożka, uwidocznionego przez oświetlone pyłki, drżące w powietrzu, a ściany tego stożka są zupełnie proste (fig. 249, str. 401). W razie, gdy źródło światła znajduje się bardzo daleko od nas, promienie zaś jego biegną blizko siebie, uważamy je za równoległe, wiązkę zaś ich — jako walec lub pryzmat. Takiem naprzykład źródłem światła jest dla nas słońce. Kilka tych doświadczeń dowodzi, iż świa-

tło w środku jednorodnym rozprzestrzenia się prostolinijnie i że gdy w biegu swym napotyka ciało nieprzezroczyste, wtedy ominąć go nie może. Kierunek, w jakim światło rozchodzi się, nazywamy *promieniem* świetlnym. Gdy słońce zasłonięte jest chmurą, przez szczeliny której przechodzą wiązki promieni, wtedy te ostatnie przedstawiają się w powietrzu jako proste smugi, przynajmniej w blizkości chmury (fig. 250). Jeżeli promienie są bardzo długie, wtedy wydają się nam złamane czyli krzywe, a zjawisko to nie polega jedynie na złudzeniu naszego oka, lecz posiada istotną fizyczną przyczynę, albowiem światło słoneczne zanim pada na ziemię, przechodzi przez warstwy powietrza rozmaitej gęstości, a więc rozprzestrzenia się w środku niejednorodnym i dlatego zbacza od pierwotnego kierunku prostolinijnego. Zobaczymy bowiem dalej, że prawo, dotyczące prostolinijnego rozchodzenia się światła, stosuje się tylko do wypadku, gdy promień świetlny przebiega środek jednorodny, a więc między innemi, jednostajnie gęsty.

§ 2. Cień i półcień.

Gdyby na świecie istniały same ciała świecące oraz środki zupełnie przezroczyste, wtedy światło rozprzestrzeniałoby się we wszelkich kierunkach bez przeszkody i widzielibyśmy tylko ciała świecące w właściwy sobie sposób. W istocie jednak napotyka ono różne ciemne przedmioty, tamujące bieg jego i odrzucające je na wszystkie strony, przez co dopiero przedmioty te, jak już wiemy, stają się widoczne. Gdy nieprzezroczyste ciało znajduje się naprzeciw światła i w pewnej odeń odległości, wtedy tylko część ciała, zwrócona do niego, jest jasna, druga zaś — odwrócona pozostaje ciemną; przestrzeń po za nieoświeconą częścią ciała również jest ciemna. Jeżeli w tyle po za ciałem umieścimy ekran, na ten ostatni padną tylko te promienie, które przechodzą mimo ciała, podczas gdy pewna płaszczyzna na ekranie pozostaje ciemna; tworzy ona to, co zowiemy *cieniem* ciała. Promienie, poprowadzone w myśli od punktu świecącego (fig. 251, str. 404) do brzegów cienia, stykają się z powierzchnią ciała, cień rzucającego,

tworząc figurę stożkowatą albo piramidalną, której wierzchołek znajduje się w punkcie świecącym; cień jest właśnie miejscem przecięcia się tej figury z ekranem. Postać cienia zależy od położenia źródła światła, od kierunku ekranu oraz od kształtu samego przedmiotu; oko nasze nieświadomie śledzi ten stosunek geometryczny pomiędzy kształtem cienia a kształtem przedmiotu i dlatego cienie stanowią dla nas drogocenną wskazówkę przy oryentowaniu się co do kształtów ciała w przestrzeni. Zasada ta jest ważna np. dla malarzy, którzy muszą dbać o to, ażeby przedmioty, przedstawione na płótnie, wydawały się tak, jak

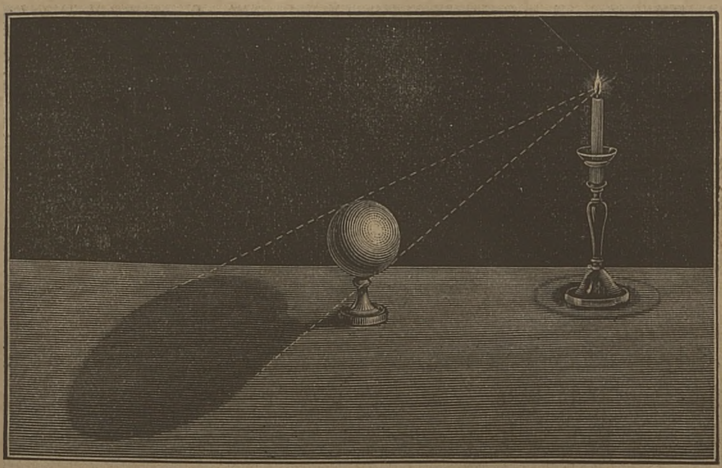


Fig. 251. Cień rzucany przez ciało nieprzezroczyste.

w przestrzeni, ażeby obraz miał, jak mówią, perspektywę. Techniczne rysunki maszyn, gmachów i t. p. składają się zwykle ze zwyczajnego oraz z t. zw. „rysunku konturowego,“ które razem dopiero pozwalają wykonawcy oryentować się co do przestrzeniowych stosunków mającego się budować przedmiotu; lecz gdy do zwykłego rysunku dodane są ściśle geometrycznie oznaczone cienie, wtedy w wielu wypadkach rysunek konturowy jest zbyteczny.

Gdy promienie świetlne pochodzą nie z punktu świecącego, lecz z powierzchni większych rozmiarów, wtedy zjawisko cienia

przedstawia się inaczej, niż w powyższym wypadku. Na fig. 252 widzimy pośrodku ciało świecące, po obu zaś jego stronach—nieprzezroczyste. I tutaj także pewna część oświecanego przedmiotu otrzymuje światło ze wszystkich punktów źródła świetlnego, inna zaś część pozostaje w zupełnej ciemności, lecz pomiędzy obydwiema widzimy pośrednią, słabo tylko oświetloną część, a więc ani zupełnie jasną, ani też zupełnie ciemną. Po za przedmiotem widzimy przestrzeń całkowicie ciemną, do której żaden promień się nie przedziera, otoczoną przestrzenią, częściowo oświetloną przez skrajne promienie i tworzącą *półcień;* zewnątrz półcienia przestrzeń jest już całkowicie oświetlona. Je-

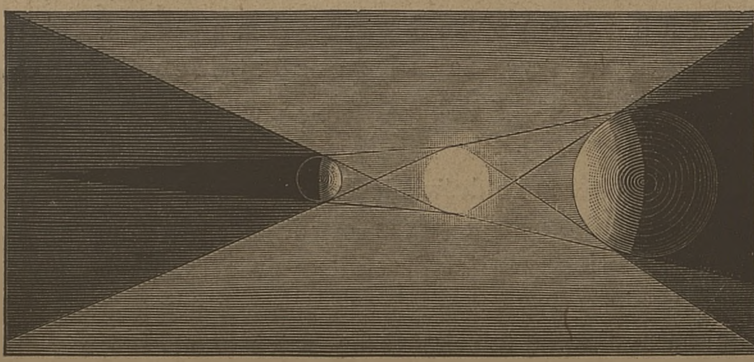


Fig. 252. Cień i półcień.

żeli ciało świecące jest większe niż przedmiot, wtedy cień jest ostro zakończony; gdy obadwa mają jednakową wielkość, cień ma kształt walcowaty; wreszcie gdy przedmiot jest większy, niż świecące ciało, cień rozszerza się coraz bardziej w miarę odległości. Co do półcienia, to średnica jego zawsze się powiększa w miarę odległości od światła. Na ekranie, umieszczonym tuż za przedmiotem, szeroki cień otoczony jest zaledwie wązkim półcieniem, który w słabym tylko stopniu zaciera kontury pierwszego; na znaczniejszej zaś odległości półcień jest większy niż cień i otrzymujemy wtedy na ekranie niewyraźną sylwetkę przedmiotu. Gdy w świetle słonecznem będziemy trzymali szpilkę tuż nad arkuszem papieru, rzuci ona nań wyraźnie zakreślony

cień; gdy oddalimy nieco papier, cień szpilki straci na wyrazistości i trudno będzie rozróżnić jego kontury.

Księżyc, ciało ciemne, oświetlone przez słońce, rzuca cień, którego długość równa prawie promieniowi orbity księżyca około ziemi; gdy więc księżyc znajduje się między słońcem a ziemią, co zdarza się niekiedy podczas nowiu, cień jego może dosięgnąć ziemi. Wtedy dla tych miejsc na powierzchni ziemi, na które pada ten cień, księżyc zupełnie zasłania sobą słońce i tam przypada całkowite zaćmienie tegoż; z miejsc zaś, na które pada półcień, widać jeszcze część słońca i zaćmienie tam jest tylko cząstkowe. Cień ziemi rozciąga się po za nią na odległość 216 promieni ziemskich, sięga więc daleko po za orbitę księżyca, której promień jest równy tylko 60 promieniom ziemskim. Podczas pełni może się zdarzyć, że księżyc całkowicie lub częściowo wchodzi w cień, rzucany przez ziemię, a wtedy mamy zjawisko zaćmienia księżyca (1).

Powróćmy teraz do doświadczenia, gdzie światło słoneczne wpada do ciemnego pokoju przez otwór w okiennicy (fig. 249, str.401). Gdy świetlny stożek przetniemy ćwiartką papieru, wtedy na tym ostatnim otrzymamy obraz słońca, który zawsze będzie posiadał formę okrągłą lub eliptyczną, zależnie od tego, czy płaszczyzna papieru będzie prostopadła lub pochyła do osi stożka. Kształt zaś otworu, przez który wpada światło, nie ma tutaj żadnego wpływu, pod warunkiem wszakże, że otwór ten jest bardzo mały w stosunku do odległości, na jakiej znajduje się od niego papier. Oddalając papier od okiennicy, powiększamy przez to obraz słońca nań rzucony. Jeżeli naprzeciwko świecy, umieszczonej w ciemnym pokoju, ustawimy ekran, a następnie pomiędzy tym ostatnim i świecą będziemy trzymali nieprzezroczystą przegrodę, zaopatrzoną w niewielki otwór dowolnego kształtu, zobaczymy na ekranie wyraźny obraz świecy, który wszakże jest odwrócony (fig. 253). Powód tego odwrócenia łatwo zrozumieć, promienie bowiem, wychodzące z górnej części świecy, muszą,

---

(1) Lommel—„Das Wesen d. Lichts.“

jeżeli mają po za otworem zachować kierunek prostolinijny, padać na dolną połowę ekranu; podobnie także promienie z dolnej części świecy padają na górną połowę ekranu. W taki sam sposób każdy punkt świecy wysyła oddzielnie swe światło na inne miejsce ekranu, na którym wskutek tego powstaje niezliczona ilość jasnych punktów, zlewających się w jeden obraz, który, jak wiemy, jest tem większy, im większa jest odległość ekranu od otworu. Oprócz tego jasność obrazu jest tem mniejsza, im większym jest obraz, wtedy bowiem ta sama ilość światła oświeca



Fig. 253. Odwrócony obraz świecy.

większą płaszczyznę. Kształt otworu, gdy ten jest dostatecznie mały, nie wpływa na postać obrazu dlatego, że jakkolwiek każdy z oddzielnych jasnych punktów, tworzących obraz, posiada formę otworu, to jednak zachodzą one jeden na drugi swemi brzegami, przez co własne ich kontury zupełnie się zacierają. Gdy znajdujemy się w gęsto ocienionym lesie, do którego promienie słoneczne wdzierają się przez otwory pomiędzy liśćmi drzew, wtedy w każdem oświeconem miejscu ziemi widzimy obraz słońca okrą-

gły lub eliptyczny, zależnie od tego, czy promienie padają na dane miejsce prostopadle lub pochyło (fig. 254). Podczas cząstkowego zaćmienia słońca obrazy te posiadają kształt wyraźnie sierpowaty; sierp ten staje się coraz węższy, w miarę jak zaćmienie wzrasta, a kierunek jego jest przeciwny kierunkowi sierpa słonecznego.



Fig. 254. Obrazy słońca na ziemi w lesie.

To, cośmy powiedzieli o świetle słońca lub świecy, stosuje się także do wszelkich promieni, pochodzących od jakiegokolwiek ciała. Gdy w ciemnym pokoju ustawimy, naprzeciwko niewielkiego otworu w okiennicy, biały ekran, ujrzymy na nim odwrócony obraz całego krajobrazu, znajdującego się po za oknem, pod warunkiem, że oświetlenie jest dostatecznie silne. Im mniejszy

przytem jest otwór, tem wyraźniejszy, ale i tem mniej jasny jest obraz; przez większe zaś otwory wpada wprawdzie więcej światła, lecz zarysy obrazów zacierają się przez to, lub też znikają zupełnie. Albowiem tylko przy dostatecznie małym otworze każdy punkt świecącego ciała wysyła swe promienie do jednego tylko miejsca na ekranie tak, że w ogóle biegną one oddzielnemi wiązkami, a to stanowi główny warunek utworzenia się obrazu. Przy większym otworze każdy punkt ekranu otrzymuje promienie ze wszystkich lub z bardzo wielu punktów świecącego ciała i dlatego obraz tego ostatniego nie może się utworzyć.

§ 3. Natężenie światła.

Wiemy dobrze, że jasność oświetlenia danego przedmiotu jest tem mniejsza, im większa jest jego odległość od źródła światła. Czytając wieczorem książkę przy lampie lub świecy, możemy łatwo przekonać się, że stopień oświetlenia zmienia się znacznie, gdy nadajemy książce inne względem promieni położenie, nawet gdy nie zbliżamy się, ani też oddalamy od świecy. Wreszcie jasność oświetlenia jest różna, zależnie od natury źródeł światła, przyczem wszystkie inne warunki mogą być te same: płomień gazowy wysyła znacznie więcej światła, niż płomień lampy olejnej, chociaż obadwa mogą być jednakowo wielkie; światło księżyca jest bez porównania słabsze, aniżeli światło słoneczne, pomimo, iż oba te ciała niebieskie przedstawiają się dla nas jako tarcze, o jednakowej prawie średnicy.

Chcąc porównać natężenie dwóch źródeł światła, należy ściśle odróżniać to, co leży w samej ich naturze, od warunków związanych z położeniem oświeconego przedmiotu, to jest z jego odległością oraz nachyleniem względem źródła i kierunku światła. Część optyki, zwana *fotometryą*, zajmuje się badaniem związku, istniejącego pomiędzy temi warunkami i jasnością oświetlenia danego przedmiotu oraz porównaniem natężenia rozmaitych źródeł światła. Mierzyć to natężenie nie jest zadaniem łatwem i pomimo całego dotychczasowego postępu optyki, nie posiadamy żadnego przyrządu, pozwalającego określać tę wielkość

z taką samą dokładnością, z jaką oznaczono inne wielkości fizyczne, np. ciśnienie powietrza za pomocą barometru, temperaturę przez użycie termometru, ilość drgań dla pewnego tonu przez syrenę lub wibroskop. Fotometrya jest jeszcze bardzo od tego daleka, a nasz sposób porównywania natężenia dwóch świateł pozostawia wiele do życzenia. Zkąd jednak pochodzi ta niedokładność, gdzie jest źródło tej niepewności? Otóż leży ono w tem, że do oceniania stopnia oświetlenia nie posiadamy żadnego innego kryterjum, oprócz subjektywnego wrażenia w organie wzroku; pomimo, że oko odczuwa odcienia barw, widzi nadzwyczaj delikatne linie i punkty, to jednak nie może ono wskazać nam dokładnego stosunku natężenia świateł, jednocześnie lub też kolejno nań działających. Nawet gdy chodzi tylko o to, czy dwa światła posiadają lub nie jednakową siłę, trudność jest niemała, a wzrasta ona jeszcze bardziej wtedy, gdy obydwie obserwacye nie mogą być dokonywane jednocześnie, lecz w pewnym odstępie czasu. W większości wypadków bezpośrednio rozpatrywane światło oślepia i razi oko nasze, dlatego też fizycy chętniej porównywują ze sobą jednorodne powierzchnie, oświetlane przez badane źródła światła i z jednakowej lub niejednakowej jasności tego oświetlenia wnoszą, czy natężenia ich są równe lub nie, Wreszcie jeszcze jeden warunek niedokładności, zaledwie dający się uniknąć, leży w różnicy barw tych świateł, które mamy porównać: niepewność naszego sądu jest tem większa, im znaczniejsza jest ta różnica pomiędzy barwami.

Pomimo tych trudności, starano się jednak znaleźć, po części na drodze teoretycznej, po części zaś na doświadczalnej, pewne prawa, dotyczące natężenia światła. Pierwsze już próby, czynione w tym celu, miały charakter czysto naukowy, albowiem w XVII już stuleciu Auzout i Huyghens, a w następnym Celsius, Bouguer i Wollaston próbowali wyrazić w liczbach stosunek natężenia światła rozmaitych ciał niebieskich. np. słońca i księżyca, lub księżyca i Syryusza.

Pierwsze prawo, odkryte przez owych fizyków, łatwo będziemy mogli zrozumieć, gdy wykonamy następujące proste doświadczenie: Postawmy przed ekranem *M* (fig. 255), umieszczonym w ciemnym pokoju, nieprzezroczysty pręt *c*, przed prętem

zaś—zapaloną świecę *a*; wtedy na ekranie utworzy się cień *n* pręta. Następnie obok świecy *a* umieśćmy drugą taką samą *b*, również zapaloną, a otrzymamy drugi cień *m* pręta. Cienie te wszakże obecnie nie są tak ciemne, jak poprzedni jedyny cień *n*, a to dlatego, że każdy z nich jest teraz oświecony przez stojącą naprzeciw niego świecę: *b* oświeca cień *n*, zaś *a* oświeca cień *m*. Gdy oddalamy świecę *b*, cień *n* staje się ciemniejszy, a więc oświeca go ona teraz słabiej; jeżeli zaś odległość świecy *b* od ekranu stanie się dwa razy większa od takiejże odległości świecy *a*, to chcąc, ażeby obadwa cienie *n* i *m* były jednakowo oświecone, należy naprzeciw cienia *n* zamiast 1 świecy *b*, postawić 4 takie same świece (fig. 256). W miarę dalszego odsuwa-

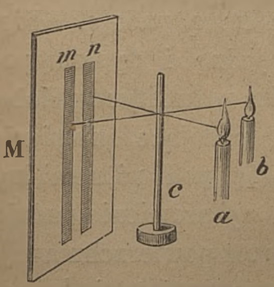


Fig. 255. Cienie pręta oświeconego przez dwie świece.

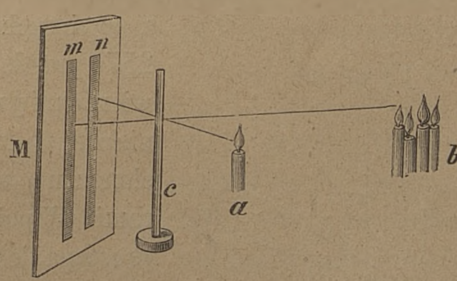


Fig. 256. Doświadczalne stwierdzenie prawa natężenia światła.

nia tych ostatnich, cień *n* znów staje się ciemniejszy od cienia *m*, a gdy świece *b* znajdą się na odległości 3 razy większej, niż w początku doświadczenia, wtedy dla zrównania jasności dwóch cieni, należy cień *n* oświecić 9 świecami. Z tego widzimy, że świeca postawiona 2 razy dalej, oświeca 4 razy słabiej, postawiona 3 razy dalej—9 razy słabiej i t. d. W ogóle więc *natężenie światła, padającego na daną powierzchnię, jest odwrotnie proporcyonalne do kwadratów z odległości tej powierzchni od źródła światła.* Prawo to stanie się dla nas zupełnie jasne, gdy przypomnimy sobie, że światło zwykle rozprzestrzenia się we wszystkie strony, że więc promienie jego są rozbieżne. Przypuśćmy, że źródło światła znajduje się w środku kuli nieprzezroczystej,

której promień jest równy 1; wtedy wewnętrzna powierzchnia kuli otrzymuje całkowitą ilość światła, wysyłanego przez to źródło. Gdybyśmy usunęli pierwszą kulę i na jej miejscu umieścili inną, mającą promień równy 2, wtedy ta sama co poprzednio ilość światła rozeszłaby się po większej powierzchni, a mianowicie 4 razy większej; albowiem gdy stosunek promieni dwóch kul jest jak 1 do 2, stosunek powierzchni tychże kul jest jak 1 do 4. Każda więc jednostka powierzchni kuli, 2 razy więcej oddalonej od źródła światła, będzie 4 razy słabiej oświeconą, 3 razy więcej oddalonej—9 razy słabiej oświeconą i t. d. Rozumie się, że prawo powyższe jest słuszne tylko wtedy, gdy pomijamy pochłanianie, jakiemu światło ulega przy przejściu przez dany środek. Natężenie światła zależy także od kąta, jaki tworzą promienie z powierzchnią, na którą padają. Fig. 257 przedstawia jednę i tę samą powierzchnię w pięciu rozmaitych położeniach, w których padające promienie słoneczne trafiają ją pod różnemi kątami. W położeniu af promienie padają prostopadle i wtedy też powierzchnia najsilniej jest oświecona; w położeniu bf, nachylonem względem płaszczyzny, prostopadłej do drogi promieni, niektóre z nich omijają ją, a widzimy, że liczba tych omijających promieni jest coraz większa, w miarę jak powierzchnia przyjmuje coraz bardziej nachylone położenia cf, df, ef. Ponieważ od większej lub mniejszej ilości promieni, padających na daną powierzchnię, zależy natężenie jej oświecenia, to widzimy, iż najsilniej oświecają ją promienie prostopadłe, najbardziej ukośne—najsłabiej; promienie zaś równoległe ślizgają się tylko po niej, nie oświecając jej wcale. Gdy do powierzchni oświecanej wystawimy prostopadłą czyli t. zw. *normalną*, wtedy promienie padające prostopadle na powierzchnię, tworzą z normalną kąt równy zeru, gdy zaś padają równolegle do niej, stanowią z normalną kąt prosty. Nazywając kąt pomiędzy normalną i promieniem padającym kątem

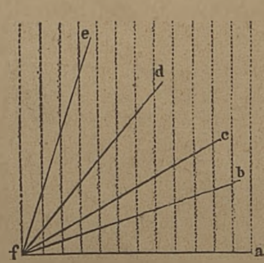


Fig. 257. Natężenie światła zależy od kąta nachylenia promieni.

padania powiemy, że *natężenie światła jest tem mniejsze, im większy jest jego kąt padania.* Słońce pozornie wschodzi codziennie, podnosi się coraz wyżej nad poziom, w południe zajmuje najwyższe położenie, poczem obniża się i znika pod poziomem. Podczas gdy słońce u nas stoi najwyżej, t. j. w południe, promienie jego najbardziej zbliżone są do kierunku prostopadłego, wtedy też świecą najsilniej, najsłabiej zaś świecą podczas wschodu i zachodu, t. j. gdy padają najbardziej ukośnie. Oprócz tego, w ciągu roku ziemia jest coraz inaczej ku słońcu pochylona, wskutek czego i oświecenie jej zmienia się w ciągu tego okresu czasu; dana miejscowość, będąc pod coraz to innym kątem nachylona, jest też silniej lub słabiej oświecana i ogrzewana, czyli ulega tak zwanym zmianom pory roku. Nachylenie osi ziemskiej do jej orbity, t. j. do drogi, jaką ziemia opisuje naokoło słońca, powoduje właśnie podział powierzchni ziemi na strefy, odróżniające się warunkami oświecenia przez promienie słoneczne.

Natężenie światła, wysyłanego przez dany element świecącej powierzchni, również zależy od kąta, jaki tworzą promienie z prostopadłą do tego elementu. Przyglądając się w ciemności rozpalonej do czerwoności kuli armatniej, nie dostrzegamy wcale kulistego jej kształtu, lecz zdaje nam się, iż mamy przed oczyma płaską okrągłą tarczę, której wszystkie punkty świecą z jednakowem natężeniem; podobne zjawisko ma także miejsce, gdy zamiast kuli, bierzemy pryzmatyczną sztabę z żelaza lub srebra i ogrzewamy ją do białości. W żadnem położeniu nie rozróżniamy krawędzi pryzmatu, a blask wszędzie jest jednakowy, niezależnie od tego, czy widzimy ściany pryzmatu w położeniu pionowem albo mniej lub więcej pochyłem; obserwatorowi zdaje się, iż ma przed sobą tylko płaską powierzchnię czworoboczną. Gdy obracamy sztabę około jej osi, ruch ten staje się widoczny tylko przez to, że szerokość dostrzeganej smugi świetlnej zmienia się, lecz blask każdego punktu pozostaje ten sam. Słońce jest olbrzymią świecącą kulą, a jednak przedstawia się nam jako tarcza, która przy powierzchownem badaniu, wydaje się wszędzie jednakowo jasna; to samo stosuje się do księżyca. Wszelako od bocznych elementów kuli promienie wychodzą gęściej i dlatego

gdyby nie istniała różnica w natężeniu wysyłanych promieni, obwodowe części kuli wydawałyby się jaśniejsze, niż jej środek. Niechaj *A* (fig. 258) wyobraża świecącą kulę, *O*—oko obserwatora, *n O* i *m O*—dwie wiązki promieni; wiązka *n O* tworzy z normalną do elementu *n* kąt równy zeru, czyli że promienie te wychodzą prostopadle; wiązka zaś *m O* tworzy z normalną do elementu *m* kąt ostry, to znaczy, że wychodzą pochylone. Przypuśćmy, że przecięcie wiązki *m O* jest równe przecięciu wiązki *n O*: jeżeli tak, to na pierwszą składa się więcej promieni, niż na drugą, albowiem element *m*, będąc pochylony i wysyłający wiązkę promieni, tej samej, co *n O* szerokości, musi ich wysłać więcej, jak to czytelnik łatwo z figury zrozumie. Ponieważ jednak jasność obu elementów *n* i *m* jest jednakowa, wynika z tego, że natężenie światła z *m* jest mniejsze, niż natężenie światła z *n*. Nazywając kąt pomiędzy promieniem wychodzącym i normalną do elementu, wysyłającego światło, kątem wyjścia, powiemy, że *natężenie światła jest tem mniejsze, im większy jest jego kąt wyjścia.*

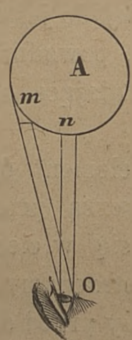


Fig. 258. Ilustracya prawa zależności natężenia światła od kąta wyjścia.

Przyrządy, służące do porównania natężenia światła, pochodzącego z różnych źródeł, zowią się *fotometrami*, zasada zaś ich w ogóle jest następująca: dwa źródła świetlne, które mamy porównać z sobą, ustawia się w taki sposób, ażeby oświecały dwie przyległe części tego samego ekranu, następnie zaś odsuwa się silniejsze światło dopóty, dopóki dwie te oświecone części nie wydadzą się nam jednakowo jasne; wtedy, według powyższego prawa, *natężenia dwóch źródeł są prosto proporcyonalne do kwadratów z ich odległości od ekranu.* W *fotometrze Rumford'a* (fig. 259) światła, które chcemy porównać, np. lampę i świecę, stawia się w ciemnym pokoju na pewnej odległości od ekranu *A B*, przed którym umieszczony jest nieprzezroczysty pręcik *c;* wtedy na ekranie tworzą się dwa cienie *a* i *b*, przyczem cień od świecy jest oświecony przez lampę i naodwrót. Następ-

pnie odsuwamy jedno ze świateł, w danym razie lampę, tak długo, dopóki jasność obu cieni nie staje się jednakową i mierzymy odległość świecy oraz lampy od ekranu; przypuśćmy, że pierwsza oddalona jest odeń na 1 metr, druga zaś na 2 m., to natężenie światła lampy jest 4 razy silniejsze od natężenia światła świecy. Gdyby stosunek odległości tych dwóch świateł od ekranu był jak 1 do 3, to przy jednakowem oświeceniu dwóch cieni *a* i *b*, natężenia świecy i lampy miałyby się jak 1 do 9. Zauważymy tutaj, że natężenie światła danego źródła wyrażamy, porównywując je z natężeniem takiego światła, które przyjmujemy za jednostkę.

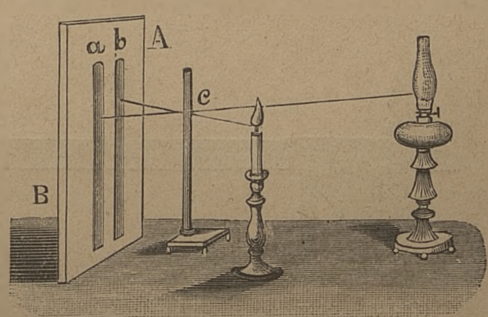


Fig. 259. Fotometr Rumford'a.

Fotometr Bunsena (fig.260,str.416), dokładniejszy, niż wyżej opisany, składa się z papierowego białego ekranu *s*, mającego pośrodku tłustą plamę od stearyny, która w tem miejscu czyni papier przezroczystym. Jeżeli światło umieścimy po za ekranem, plama stearynowa wyda się jaśniejszą od otaczającej powierzchni, albowiem papier, nasiąknięty tłustością, przepuszcza więcej promieni; przeciwnie, gdy ustawimy światło przed ekranem, plama przedstawi się ciemno na jaśniejszem tle, albowiem tłusty papier gorzej odbija światło, niż papier suchy. Umieściwszy tedy ekran pomiędzy dwoma światłami, możemy tak ustosunkować ich odległość od niego, że plama stearynowa i pozostała powierzchnia będą jednakowo oświecone, co poznajemy po tem, że plama znika dla oka i nie odróżnia się wcale od reszty papieru. Postawmy za ekranem np. lampkę gazową (*b*), przed nim zaś— świecę (*a*) i przesuwajmy go dopóty, dopóki plama nie zniknie; wtedy natężenia dwóch świateł mają się jak kwadraty z ich od-

ległości od ekranu, którą to odległość mierzy się na skali fotometru.

Przy opisanych pomiarach fotometrycznych, oko nasze, jak już wspomnieliśmy, jest głównym sędzią, ono to bowiem ocenia stopień oświecenia, wskutek czego pomiary takie są czysto subjektywne. Dokładność ich zależy więc od mniejszej lub większej ścisłości, z jaką sądzimy o tem, czy dwie powierzchnie są lub nie są jednakowo oświecone, a to zależy znowu od indywidualnej zdolności oceniania różnicy w natężeniu dwóch świateł. Z odnośnych badań, przy których posługiwano się fotometrem, wynika, że oko nasze może odczuwać różnice w natężeniu światła tylko do pewnej granicy. Przypuśćmy, że część ekranu jest

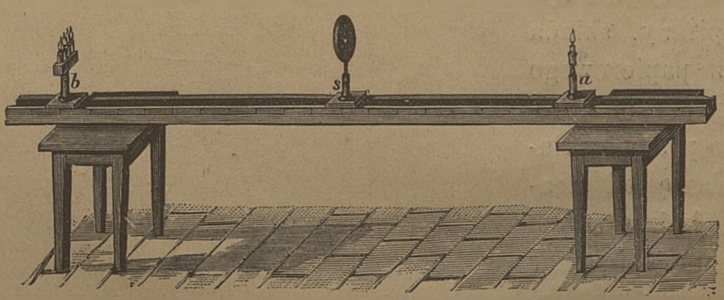


Fig. 260. Fotometr Bunsena.

oświecona tylko przez jedno światło, znajdujące się od niego na odległości 1 metra, część zaś—przez to samo światło i jeszcze przez drugie, o jednakowem natężeniu, lecz znajdujące się na odległości 10 metrów; stosunek tedy oświecenia tych dwóch części jest jak 1 do 1,01. Otóż w tych warunkach oko ludzkie nie może dostrzedz różnicy w jasności części ekranu, na którą pada tylko jedno światło i części oświeconej przez obadwa jednocześnie, czyli innemi słowy, nie jest ono w stanie ocenić natężenia światła z przybliżeniem większem, jak do $^1/_{100}$ istotnej jego wartości (Fechner). Bouguer i Wollaston starali się porównać światło słoneczne z księżycowem, biorąc za jednostkę światło świecy woskowej i znaleźli zgodnie, że słońce świeci tak silnie, jak 5600

KSIĘGARNIA NAKŁADOWA

H. OLAWSKIEGO

Mazowiecka Nr. 6,

POLECA:

HISTORYĘ NATURALNĄ

D-ra G. Hayeka,

zawierającą 72 tablic zoologicznych z 845 kolorowanemi figurami, 40 tablic botanicznych z 445 kolorowanemi figurami i 8 mineralogicznych z 75 figurami. — Cena kompletu Rs. 18; w ozdobnej oprawie Rs. 22.

Także do nabycia (tak długo jak zapas starczy)

w 30-tu zeszytach po kopiejek 60.

Autorowi dzieła *przyznano* na wystawie w Tryeście w r. 1882 **złoty medal** w dziale sztuk i nauk.

HISTORYĘ POWSZECHNĄ

BECKERA,

w przekładzie dopełnionym i uzupełnionym

w epoce dziejów najnowszych,

pod redakcyą **M. Wołowskiego**, w 12 tomach po Rs. 1 kop. 10 za tom (oprawne tomy zawierające po 2 tomy po Rs. 2 kop. 50) lub w zeszytach po kop. 10.

GEOGRAFJĘ POPULARNĄ

czyli

Ziemia w malowniczych obrazach.

Opisy najciekawszych krajów, ludów i miejscowości według najnowszych źródeł i najcelniejszych autorów, opracował

Dr. Wł. Wicherkiewicz,

z mapkami i drzeworytami, w 53-ch zeszytach po kop 15.

Podręczniki do nauki języków obcych

(Z WYMOWĄ)

podług metody **D-ra H. Loewego.**

JĘZYK FRANCUZKI
ze słownikiem
francuzko-polskim i polsko-francuzkim,
komplet w 25 zeszytach
po 15 kop.

JĘZYK NIEMIECKI
ze słownikiem
polsko-niemieckim i niemiecko-polskim,
komplet w 25 zeszytach
po 15 kop.

Roznosiciele mają Prospekty i Zeszyty na okaz!

Roznosiciele mają Prospekty i Zeszyty na okaz!

Дозволено Цензурою, Варшава 21 Апрѣля 1889 г.

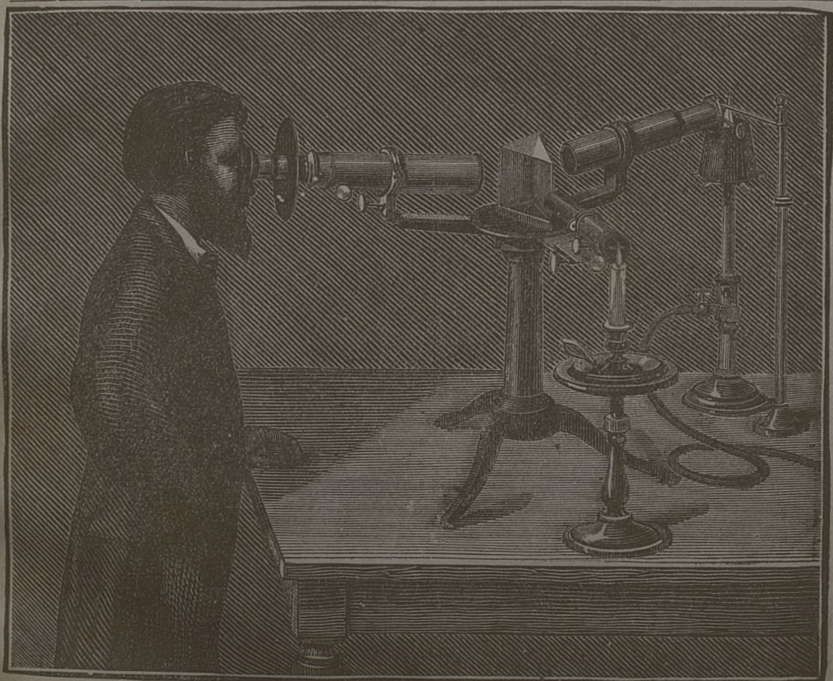
Druk Jana Cotty w Warszawie, Senatorska 29.

Cena 20 kop. **Zeszyt 14.** Cena 20 kop.

SIŁY PRZYRODY.

POPULARNY WYKŁAD FIZYKI

I GŁÓWNIEJSZYCH JEJ ZASTOSOWAŃ.



Spektroskop.

Podług dzieła A. Guillemin'a „Le monde physique"

OPRACOWALI

Józefowa Nusbaum

bak. n. prz.

i

Henryk Silberstein

dr. fil., b. as. chem. przy un. w Bernie.

WARSZAWA.

Nakładem Księgarni **H. Oławskiego**, ul. Mazowiecka № 6.

1889.

świec woskowych, umieszczonych na odległości 30 centymetr. Dalej Wollaston znalazł, że światło księżyca w pełni wynosi tylko 144 część światła świecy woskowej na rzeczonej odległości, z czego wynikałoby, że słońce świeci 800000 razy silniej, aniżeli księżyc w pełni; Bouguer zaś podaje cyfrę o wiele mniejszą od ostatniej. W każdym razie przedmiot ten stanowi szerokie pole do badań, na którem dużo jeszcze zdziałać potrzeba, zanim rezultaty zdołają wzbudzić zupełne nasze zaufanie.

§ 4. Prędkość światła.

W starożytności już przypuszczano, że światło potrzebuje pewnego czasu na przebycie danej drogi, że nie dosięga naszego oka, ani też pada na przedmiot w tej samej chwili, w której wysłane zostaje przez odnośne źródło, znajdujące się na znaczniejszej od nas odległości. Lecz przypuszczenie to zamieniło się w pewność nie dalej jak 200 lat temu, gdyż wszystkie doświadczenia, urządzane do owego czasu z ziemskiemi źródłami światła, nie doprowadziły do żadnego rezultatu, a to z powodu nadzwyczajnej prędkości światła. W ciągu jednej sekundy przebiega ono niemniej jak 300000 kilom. czyli prawie 41000 mil geograficznych tak, że na przebycie drogi od księżyca do ziemi potrzebuje tylko $1\frac{1}{4}$ sekundy, od słońca zaś do nas przybywa w ciągu 8 minut i 13 sekund. Jak nieznacznym jest ten czas, można się przekonać z tego, że kula armatnia, biegnąca z szybkością 400 m. na sekundę, potrzebowałaby na przebycie drogi od ziemi do słońca przeszło 12 lat. Porównywując prędkość światła z prędkością dźwięku, znajdujemy, że pierwsza jest około 900000 razy większa, aniżeli druga, jest ona nadto 10000 razy większa od prędkości ziemi na jej orbicie.

Obecnie zajmiemy się opisem metod, które pozwalają obliczyć prędkość światła, a rozpoczniemy od metody najdawniejszej; przedtem jednak zrobić musimy kilka uwag przedwstępnych. Przypuśćmy, że gdziekolwiek dają sygnały świetlne w równych odstępach czasu, że np. co 10 minut zapalają tam proch i wyobraźmy sobie, że obserwator, znajdujący się w pewnej od-

ległości, nie zmieniający swego miejsca, widzi każdy sygnał nieco później, niż on powstaje rzeczywiście; opóźnienie jest dla wszystkich tych sygnałów jednakowe, to znaczy, że obserwator widzi je zawsze w odstępach dziesięciominutowych, bez względu na to, czy światło biegnie z większą lub mniejszą prędkością. Gdy zaś obserwator po zanotowaniu czasu, w którym zobaczył jeden z sygnałów, przejdzie do punktu bardziej oddalonego i tam będzie oczekiwał następnego sygnału, wtedy zobaczy on ten ostatni nieco później, niż po 10 minutach, albowiem światło musi przejść teraz dłuższą drogę. Ażeby rozumowanie to uczynić przystępniejszem, przyjmijmy prędkość światła o wiele mniejszą, niż jaka ona jest w istocie i przypuśćmy, że po danym sygnale obserwator oddalił się na 20 kilometrów, przyczem czas pomiędzy ujrzeniem owego sygnału a zobaczeniem następnego wynosił 10 minut i 2 sekundy. Obserwator słusznie wniósłby z tego, że 2 sekundy, o które następny sygnał się spóźnił, stanowią właśnie czas, jakiego wymaga światło na przebycie dodatkowych 20 kilometrów, czyli że prędkość światła wynosi 10 kilom. na sekundę. Gdyby przeciwnie obserwator był się zbliżył o 20 kilom., wtedy czas pomiędzy dwoma następującemi po sobie sygnałami byłby o 2 sekundy krótszy.

W istocie jednak prędkość światła jest bez porównania większa i dlatego nie możnaby w powyższy sposób dojść do celu za pomocą ziemskich sygnałów świetlnych i odległości, dających się bezpośrednio zmierzyć. Starano się tedy zużytkować do tych oznaczeń zjawiska, prawidłowo zachodzące w systemie słonecznym. Posługując się nowowynalezionym teleskopem, Galileusz i Simon Marius już w początku XVII stulecia pokazali, że wokoło najświetniejszej planety rzeczonego systemu—Jowisza—krążą cztery księżyce. Obiegają one w dość krótkich odstępach czasu to wielkie centralne dla nich ciało niebieskie po orbitach, które tylko nieznacznie zbaczają od płaszczyzny równika Jowisza. To, co w ogóle z naszym księżycem dzieje się rzadko, z księżycami Jowisza zdarza się przy każdym prawie obrocie: wchodzą one w przestrzeń ciemną, znajdującą się po stronie Jowisza, odwróconej od słońca i ulegają wskutek tego

zaćmieniu. Przy pomocy teleskopów umiarkowanie powiększających, można z łatwością obserwować te zaćmienia, dość często, przynajmniej z trzema bliższemi Jowisza księżycami, się zdarzające. Fig. 261 objaśni nas, przy jakich warunkach to zanurzanie się

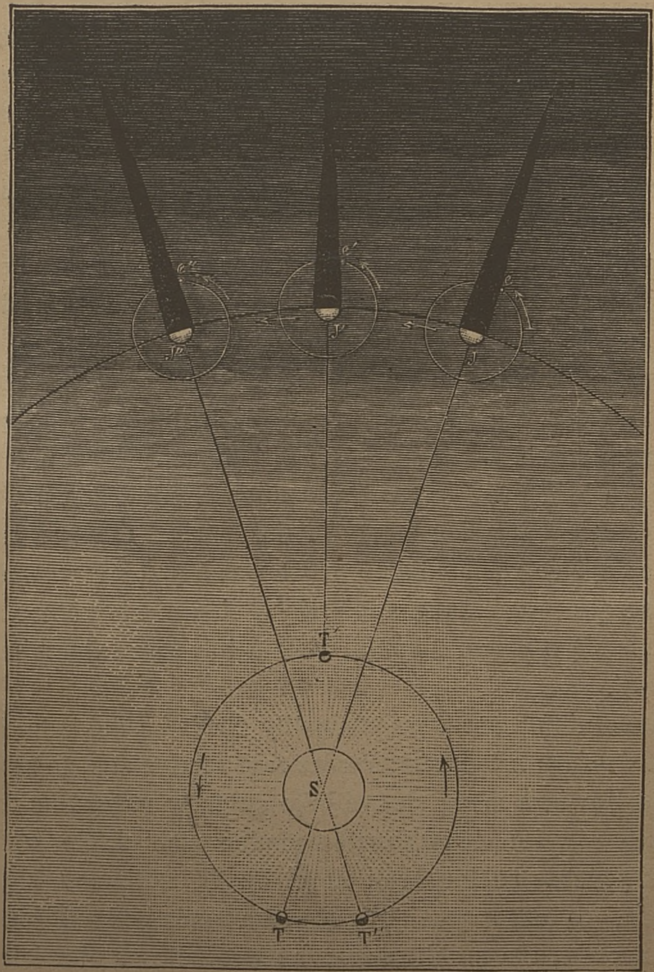


Fig. 261. Oznaczenie prędkości światła z obserwacyi zaćmień księżyców Jowisza.

rzeczonych księżyców w cieniu, lub też wynurzanie z niego, staje się w danej chwili widocznem dla mieszkańców ziemi.

Podczas gdy ziemia *T* biegnie po swej drodze naokoło słońca, bardziej odległy od tego ostatniego Jowisz *J*, porusza się

w tym samym kierunku, lecz o wiele wolniej tak, że wykonywa on zaledwie jedenastą część obrotu w tym samym czasie, kiedy ziemia robi całkowity obrót. Gdy ziemia znajduje się w T, Jowisz zaś w J, to jest wraz z ziemią na jednej prostej linii ze słońcem S, lecz po dwóch przeciwnych jego stronach, wtedy Jowisz jest dla nas niewidzialny. Ponieważ jednak Jowisz porusza się w tym samym co i ziemia kierunku (oznaczonym na figurze strzałkami), lecz wolniej, to po upływie pewnego czasu na rannem niebie przed wschodem słońca dostrzegamy Jowisza i możemy obserwować zanurzanie się bliższego jego księżyca w cieniu; wynurzanie zaś jego jest dla nas wtedy niedostrzegalne z powodu przeszkadzającej temu kuli samej planety. Im dalej poruszamy się po wskazanej drodze, tem bardziej odległym od słońca wydaje się Jowisz, aż wreszcie ziemia dochodzi do T', Jowisz zaś do J', a wtedy dwie te planety znajdują się znów na jednej prostej linii ze słońcem, lecz obydwie po tej samej stronie. W tym czasie Jowisz przedstawia się nam w najświetniejszym blasku, lecz zaćmienia jego księżyców są dla nas zupełnie niewidoczne, ponieważ cały stożkowaty cień po za Jowiszem jest przezeń zakryty. Następnie dopiero zaćmienia te możemy znów obserwować, lecz nie ich początek czyli zanurzanie się w cieniu, ale koniec, a więc wynurzanie się z niego, dopóki ziemia i Jowisz nie zajmą położeń T'' i J''.

Wieloletnie obserwacye pozwoliły z wielką dokładnością obliczyć czas obrotu księżyców; oprócz tego znaleziono, że zaćmienia księżyców Jowisza mogą służyć jako sygnały naturalne do porównania zegarów i dlatego chwile zaćmień tych ściśle obliczano. Ponieważ podczas ruchu ziemi od T ku T' zbliżamy się wciąż do Jowisza, to czas pomiędzy dwoma zaćmieniami jest coraz krótszy, niż wypada z obliczenia, aż wreszcie w niewielkiej odległości od T' różnica ta dochodzi do 16 minut i 30 sekund; gdy następnie, poruszając stę od T do T''', oddalamy się od Jowisza, wtedy odstęp czasu pomiędzy dwoma następnemi zaćmieniami wzrasta i w niewielkiej odległości od T''' dochodzi znów do pierwotnej obliczonej wielkości tak, że różnica owa wyrównywa się zupełnie. Łatwo zrozumieć, że ta różnica w czasie wynosi wła-

śnie tyle, ile go wymaga światło na przebycie dłuższej drogi, a więc że jest ona równa czasowi, w ciągu którego światło przebiega średnicę orbity ziemskiej naokoło słońca, z czego wynika, że promień wychodzący od słońca, dosięga ziemi po upływie połowy tego czasu (16 minut i 30 sek.), to jest po 8-miu minutach i 15 sekundach; odległość ziemi od słońca wynosi 299,270,000 kilometrów, prędkość więc światła równa się $\frac{299,270000 \text{ kil.}}{8 \text{ min. } 15 \text{ sek.}}$, czyli 302300 kilometrów na sekundę.

Za pomocą wyżej opisanej metody, duński astronom Olaf Roemer pierwszy w roku 1675 oznaczył czas, jakiego wymaga światło na przebycie drogi od słońca do nas. Inne, również ważne odkrycie, pozwalające oznaczyć prędkość światła, zostało dokonane pięćdziesiąt lat później przez astronoma Bradley'a; dla lepszego wyjaśnienia zasady metody Bradley'a posłużymy się porównaniem. Przypuśćmy tedy, że pada gęsty deszcz w kierunku dokładnie prostopadłym do ziemi i że na niej ustawiliśmy pionowo prostą otwartą rurę; wtedy kropla deszczu, wpadająca do niej przez sam środek górnego jej otworu, padnie także na środek otworu dolnego, dopóki rura będzie stała w miejscu. Lecz gdy poczniemy przesuwać rurę z jednostajną prędkością i w pewnym określonym kierunku, wtedy kropla taka nie spotka już środka dolnego jej otworu, lecz w razie, gdy prędkość ruchu jest dostatecznie wielka—będzie podczas spadania uderzała o ścianę rury. Chcąc więc, ażeby kropla i w tym razie trafiła środek podstawy rury, należy tę ostatnią nieco pochylać w stronę, w którą się porusza i to w taki sposób, ażeby górny jej koniec wyprzedzał dolny o taką samą odległość, na jaką przesunęła się rura w ciągu czasu, użytego przez kroplę na przebycie długości rury. Pochylenie rury pozwala nam tedy porównać prędkość spadania kropli z prędkością przesuwania rury; gdy naprzykład długość tej ostatniej równa się 1 metrowi, górny zaś jej koniec wyprzedza dolny o 1 centymetr, wtedy prędkość kropli jest 100 razy większa od prędkości rury. Gdybyśmy oprócz tego umieścili rurę na łodzi i płynęli z nią dokoła wyspy, to wskutek ciągłego pochylania rury w kierunku naszego ruchu, opisałaby ona podczas całkowitego obrotu stożek, zwrócony wierzchołkiem ku

ziemi i mający oś prostopadłą do płaszczyzny wyspy i stawu, po którym płynęlibyśmy.

Stosując obecnie to porównanie do systemu ciał niebieskich powiemy, że łódź wyobraża ziemię, wyspa—słońce, powierzchnia stawu—płaszczyznę ekliptyki, w której ziemia obraca się naokoło słońca, deszcz zaś—promienie świetlne, wysyłane przez gwiazdę stałą, znajdującą się na linii prostopadłej do tej płaszczyzny, a więc w tak zwanym biegunie ekliptyki. Obserwując taką gwiazdę przez teleskop, musimy, wskutek ciągłego ruchu ziemi, nachylać go tak, ażeby kierunek, w jakim widzimy wtedy

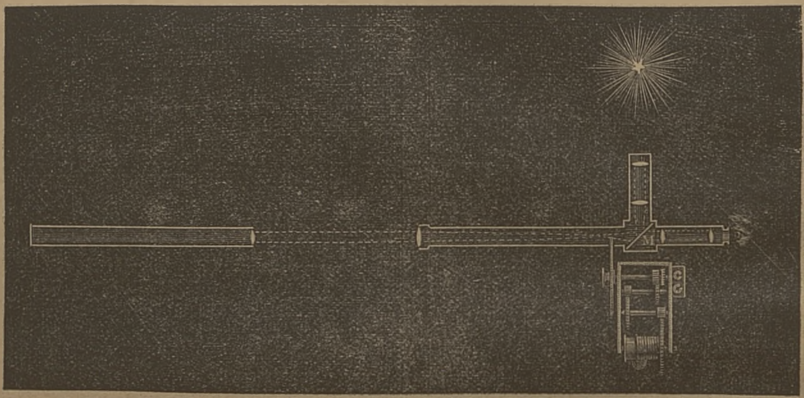


Fig. 262. Przyrząd Fizeau do bezpośredniego oznaczania prędkości światła.

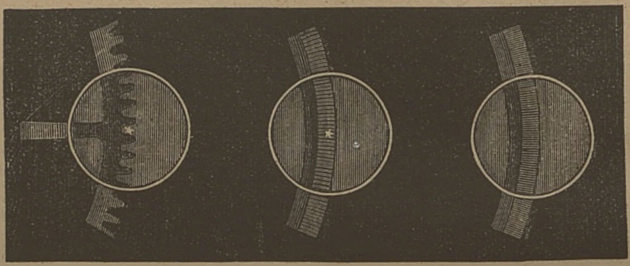
gwiazdę, stanowił z istotnym jej kierunkiem kąt równy 20″,445; w ciągu roku całego teleskop opisuje stożek, gwiazda zaś pozornie opisuje na niebie koło. Zjawisko opisane zowie się *aberracyą gwiazd stałych* i odkryte zostało, jak już powiedzieliśmy, przez Bradley'a w r. 1728, który objaśnił je na podstawie rocznego ruchu ziemi oraz tem, że światło do swego rozprzestrzeniania się wymaga czasu. Przy kącie nachylenia teleskopu równym 20″,445, górny jego koniec wyprzedza dolny o długość, wynoszącą $^1/_{10000}$-ną część długości rury teleskopowej, a więc światło porusza się z prędkością 10000 razy większą od prędkości ziemi na jej orbicie około słońca. Liczba, w ten sposób dla prędkości

światła znaleziona, nie bardzo się różni od tej, którą otrzymał Roemer z obserwacyj zaćmień księżyców Jowisza.

Wreszcie w nowszych czasach udało się uczonym francuzkim Fizeau i Foucault dokazać tego, czego nadaremnie próbował Galileusz, a mianowicie oznaczyć prędkość światła przy względnie małych odległościach na ziemi, za pomocą sztucznie wywołanych ruchów. Opiszemy tutaj tylko metodę Fizeau. Obrał on Suresnes za miejsce obserwacyi i umieścił tam przyrząd, przedstawiony na fig. 262. Promienie bardzo silnego światła sztucznego, po wejściu do bocznej rury, gdzie ulegały nieznacznemu skupieniu przez dwa szkła dwuwypukłe (działanie takich szkieł poznamy niebawem), padały pod kątem 45° na nieposrebrzone zwierciadło szklane *M*, od którego odbijały się w kierunku rury poziomej, t. j. lunety. Na końcu tej ostatniej znajdowała się również soczewka dwuwypukła, czyli objektyw, tak umieszczona, że czyniła ona wychodzące z lunety promienie równoległemi i takiemi też dochodziły one do drugiej stacyi obserwacyjnej w Montmartre; tam przechodząc przez soczewkę w drugiej lunecie, znów ulegały skupieniu, padały na zwierciadlo (na rysunku opuszczone), które odbijało je napowrót do tego samego punktu, zkąd przyszły. Powracające promienie zbierały się w pierwszej lunecie, przechodziły przez nieposrebrzone (a więc przezroczyste) zwierciadło szklane *M* i mogły być widziane za pośrednictwem soczewki, zwanej okularem, po przebyciu przez nie drogi od Suresnes do Montmartre i napowrót.

Zadanie polegało więc na dokładnem określeniu czasu, jakiego wymagały promienie na przebycie tej podwójnej drogi; w tym celu Fizeau, przez boczny otwór w ścianie pierwszej lunety, umieścił na drodze promieni, w miejscu, gdzie one najsilniej były skupione, koło zębate, które za pomocą mechanizmu zegarowego mogło być wprawione w bardzo szybki i jednostajny ruch obrotowy. Ile razy ząb koła stanął na drodze światła, przeszkadzał on rozprzestrzenianiu się jego, podczas gdy przez przerwę między dwoma zębami przechodziło ono swobodnie. Gdy przed rozpoczęciem ruchu obrotowego położenie koła jest takie, że światło może przejść pomiędzy dwoma zębami, wtedy także

i powracający z Montmartre promień znajdzie drogę otwartą i dosięgnie oka obserwatora w Suresnes, który widzi punkt świetlny w całym jego blasku (fig. 263, strona lewa). Gdy koło rozpoczyna swój obrót z niezbyt wielką prędkością, wtedy niektóre z promieni, które przeszły przez lukę między dwoma zębami, napotykając przy powrocie z Montmartre ząb, zostają zatrzymane w swym biegu i nie dochodzą do oka obserwatora; dla tego ostatniego więc punkt świetlny traci na intensywności i wydaje się bledszy, niż przedtem (fig. 263 środek). Im prędzej obraca się koło, tem więcej promieni zostanie zatrzymanych w swym biegu, aż wreszcie przy dostatecznie wielkiej szyb-



Fig, 263. Doświadczenie Fizeau, służące do oznaczenia prędkości światła; rysunek lewy—punkt swietlny, widziany po przez lukę między dwoma zębami koła; rysunek środkowy—częściowe zaćmienie punktu świetlnego; rysunek prawy—całkowite zaćmienie punktu świetlnego.

kości obrotu wszystkie promienie, które przeszły przez lukę między dwoma zębami, napotykają przy powrocie na jeden z tych zębów, a wtedy następuje całkowite zaćmienie punktu świetlnego (fig. 263, strona prawa). Łatwo zrozumieć, że w tym ostatnim wypadku światło potrzebuje na przebycie drogi od Suresnes do Montmartre i napowrót tyle czasu, ile go upływa, zanim na miejsce luki przypadnie sąsiedni ząb.

Do doświadczeń swych Fizeau używał koła o 720 zębach i przekonał się, że całkowite zaćmienie następowało wtedy, gdy koło to robiło 12,6 obrotów na sekundę. W ciągu więc jednej sekundy wszystkie 720 zębów przechodziły przed okiem 12,6 razy, czyli że przewijało się w ciągu tego czasu 9072 zębów

(720×12,6); każdy więc pojedyńczy ząb był zastępowany przez następny po upływie $^1/_{9072}$ sekundy, ażeby zaś na miejsce odstępu między zębami znalazł się najbliższy ząb, potrzeba było tylko połowy tego czasu, to jest $^1/_{18144}$ sekundy. W ciągu tego czasu światło, jak wiemy, przebiegało drogę od Suresnes do Montmartre, wynoszącą 8633 metrów i napowrót, czyli razem 17266 metrów; w ciągu więc całej sekundy przebyłoby drogę 18144 razy większą, t. j. w okrągłej liczbie 313000 kilometrów. Rezultat ten, jak widzimy, prawie zupełnie się zgadza z rezultatem powyższych astronomicznych obserwacyj. Również i inne doświadczenia, dokonane przez Foucault'a za pomocą obracających się zwierciadeł, dały wielkość, mało się różniącą od wartości wspomnianych. Według ostatnich doświadczeń Cornu, światło przebiega 300400 kilometrów na sekundę,

---

ROZDZIAŁ III.

Odbijanie się światła (Katoptryka).

§ 1. Prawa odbicia.

Długi czas zanim człowiek pomyślał o tem, ażeby polerować metale i szkła w celu zamiany ich w zwierciadła, mające służyć potrzebom życia codziennego i nauki, albo także i ludzkiej próżności, można było w naturze obserwować liczne zjawiska, zależne od odbijania się światła. Powierzchnia każdego stawu, każdego jeziora przedstawia zwierciadło, dające wierny obraz otoczenia, błękitnego sklepienia niebios, chmur, słońca lub gwiazd, drzew, skał i istot żyjących. Już sama obserwacya tych zjawisk naturalnych mogłaby nas objaśnić co do drogi, jaką przebywa światło, gdy, wychodząc z punktów świecących, pada na powierzchnię, która je odbija; jednakże ścisłe prawa odbicia światła odkryto dopiero za pomocą sztucznych zjawisk—doświadczeń.

W poprzednim rozdziale wyłuszczyliśmy obszernie, że promień światła zachowuje kierunek prostolinijny tak długo, dopóki

rozprzestrzenia się w jednym i tym samym przezroczystym środku, bez względu na to, czy jest on ciałem gazowem, ciekłem lub też stałem. Lecz gdy wiązka światła uderza o powierzchnię, odgraniczającą dwa środki różnej gęstości, wtedy zjawisko się zmienia: jedna mianowicie część promieni wraca od powierzchni odgraniczającej napowrót do środka, w którym poprzednio się poruszała, to jest ulega *odbiciu*, inna zaś część przenika do drugiego środka, gdy ten jest przezroczysty , ulegając zboczeniu od pierwotnego kierunku czyli *załamaniu.* Obecnie zajmiemy się zbadaniem dwóch tych rodzajów zjawisk i rozpoczniemy od odbijania się światła.

Sposób, w jaki promienie świetlne zostają odbite przez daną powierzchnię, zależy od wielu okoliczności, w pierwszej linii od budowy samej powierzchni. Gdy ta ostatnia z natury jest gładka i równa, jak np. powierzchnia cieczy zupełnie spokojnej, szczególnie rtęci, albo gdy za pomocą środków mechanicznych nadano jej wielką gładkość, jak powierzchni szkła, wielu metali i t. p., wtedy promienie odbijają się w określonym kierunku i według stałych praw. Oku naszemu zdaje się wtedy, że promienie wychodzą z punktów, leżących po za powierzchnią odbijającą, wydaje się nam, jakoby przedmiot znajdował się za tą ostatnią. Kształt, wielkość i położenie tworzących się obrazów zależą od kształtu powierzchni odbijającej, zwanej *zwierciadłem.* Jeżeli natomiast powierzchnia ciał jest matowa i chropawa, wtedy promienie odbijają się od niej nieprawidłowo, obrazy przedmiotów wysyłających światło, wcale się nie tworzą, albowiem każdy element samej powierzchni staje się punktem wyjścia wielu promieni, z różnych miejsc ciała świecącego pochodzących tak, że widzimy tylko tę oświeconą powierzchnię.

Co się tyczy drogi, jaką przebywa promień odbity od płaskiego zwierciadła, to rzecz oczywista, że musi ona być prostolinijna, albowiem promień ten zostaje napowrót odrzucony do środka, według założenia naszego zupełnie jednorodnego; zachodzi tedy jeszcze pytanie, jaki jest kierunek promienia odbitego. W celu zbadania tego, obserwujmy np. promienie, dochodzące do nas od gwiazdy, a więc promienie, które ze względu na odległość

punktu świecącego możemy uważać za równoległe i pozwólmy im odbić się od powierzchni rtęci. Niechaj *S I* przedstawia jeden taki promień (fig. 264), padający w *I* i odbity w kierunku *I R*. Umieśćmy z boku naczynia z rtęcią przyrząd, składający się z pionowo osadzonego koła, podzielonego na stopnie, na którem

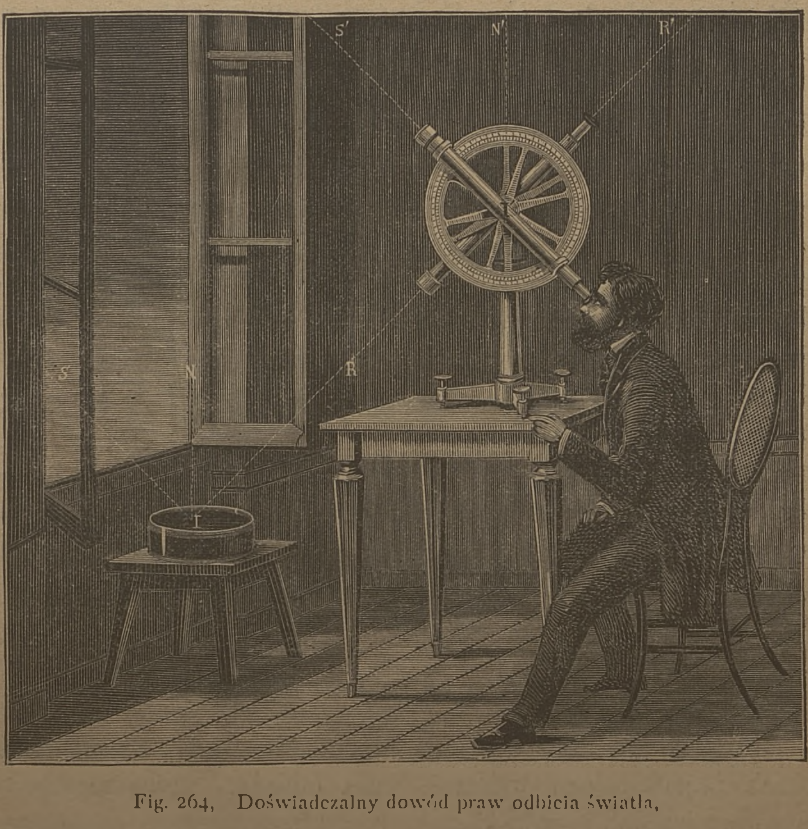


Fig. 264. Doświadczalny dowód praw odbicia światła.

znajdują się dwie lunety, mogące się obracać w płaszczyznie tegoż koła, około jego środka. Koło to i lunety ustawione są w jednej płaszczyznie z promieniem padającym, oraz z prostopadłą czyli tak zwaną normalną w punkcie padania *I*. Jednę z tych lunet skierujmy na powierzchnię rtęci tak, ażebyśmy w niej dostrzegli obraz gwiazdy, innemi słowy, ustawmy lunetę w kie-

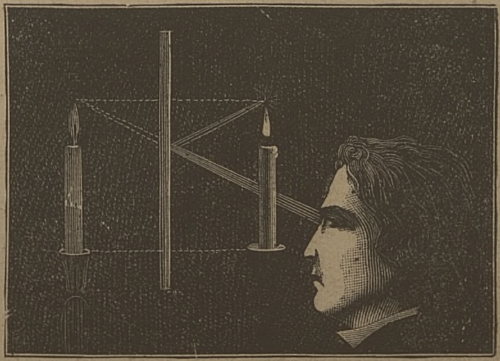
runku odbitego promienia; drugą lunetę skierujmy wprost na gwiazdę, a więc nadajmy jej położenie równoległe do kierunku promienia padającego. Jeżeli teraz ze środka I' koła wystawimy normalną $I' N'$, to dokładne odczytanie stopni pokaże nam, że osie obydwóch lunet tworzą z tą normalną kąty równe, czyli że $S' I' N' = R' I' N'$. Z geometryi wiadomo, że kąty o odpowiadających sobie bokach równoległych, są równe; ponieważ tedy $I' N'$ jest równoległy do $I N$, a $S' I'$ równoległy do $S I$, to kąt $S' I' N'$ jest równy kątowi SIN. Dalej równoległe $I' N'$ i $I N$ przecięte są jedną prostą linią $I R'$, a geometrya pokazuje, że wtedy kąt $R' I' N'$ jest równy kątowi RIN, a więc $SIN = RIN$. Kąt SIN pomiędzy promieniem padającym i normalną w punkcie I nazywa się *kątem padania;* kąt zaś $R I N$ pomiędzy promieniem odbitym i tą normalną nazywa się *kątem odbicia.* Rezultat więc powyższy możemy ująć w następujące prawo: *Kąt odbicia jest równy kątowi padania.* Za pomocą powyższego przyrządu możemy przekonać się także, że promień odbity od powierzchni rtęci widzimy przez lunetę tylko wtedy, gdy koło znajduje się istotnie w jednej płaszczyznie pionowej z promieniem padającym i normalną w punkcie padania, z czego wyprowadzamy drugie prawo: *Promień padający i odbity leżą w jednej płaszczyznie z prostopadłą w punkcie padania do powierzchni odbijającej.* Dwa wymienione tutaj prawa stanowią podstawę całej nauki o odbiciu światła.

§ 2. Odbicie od zwierciadeł płaskich.

Rozpatrzmy obecnie zjawiska odbicia od zwierciadeł płaskich i powstające wskutek tego obrazy, które tworzą się w zwierciadłach i mają kształt rozmaity, zależnie od położenia przedmiotu oraz od rodzaju samej powierzchni odbijającej. Przykład zwierciadła płaskiego przedstawiają np. zwykłe pokojowe lustra, lub też spokojna powierzchnia niewielkiej masy cieczy.

Gdy jakikolwiek przedmiot znajduje się przed płaskiem zwierciadłem, wtedy w tem ostatniem, jak wiadomo, widzimy wierny obraz przedmiotu, zgodny z nim zupełnie co do kształtu,

wielkości i barwy; jedyna różnica polega na tem, że przedmiot i obraz są symetryczne względem siebie, czyli że lewa strona jednego jest prawą drugiego i naodwrót. Dalej pozorna odległość obrazu po za powierzchnią odbijającą jest dokładnie taka sama, jak istotna odległość przedmiotu od tejże powierzchni. Ze wszystkich tych zjawisk łatwo można sobie zdać sprawę, przy pomocy fig. 265; widzimy tutaj wiązkę promieni, które, rozbiegając się od wierzchołka płomienia, padają na płaskie zwierciadło, odbijają się odeń i wpadają do oka obserwatora, jako wiązka również rozbieżnych promieni. Obraz wierzchołka płomienia może powstać albo tam, gdzie promienie z wierzchołka tego wy-



Fig, 265, Zwierciadło płaskie, Kształt i położenie obrazu,

chodzące, istotnie się przecinają po odbiciu, albo też w miejscu, gdzie przecinają się tylko przedłużenia promieni odbitych. Pierwszy wypadek nie może mieć tutaj miejsca, albowiem promienie odbite, w miarę odległości od zwierciadła, rozchodzą się coraz bardziej, przecinają się też tylko ich przedłużenia, a oku, znajdującemu się na ich drodze, zdaje się, jakoby promienie wychodziły z punktu po za zwierciadłem, leżącego, jak pokazuje rachunek, na tej samej wysokości co i wierzchołek świecy i na równej z nim odległości od powierzchni odbijającej. To, cośmy powiedzieli o wierzchołku płomienia, stosuje się zarówno do wszystkich pozostałych punktów świecy: każdemu z nich odpo-

wiada obraz po za zwierciadłem, a obrazy te tak się zlewają, że tworzą całość zupełnie zgodną z przedmiotem. Obrazy takie w płaskich zwierciadłach zowią się *urojonemi* dlatego, że w rzeczywistości nie istnieją, po za zwierciadło bowiem promienie przejść nie mogą i nam tylko wydaje się, iż one ztamtąd wychodzą. Figura 266 pokazuje, że można w zwierciedle zobaczyć także obraz przedmiotu, nie znajdującego się naprzeciw powierzchni odbijającej, lecz z boku; potrzeba tylko, ażeby oko zostało uderzone przez promienie odbite, a więc żeby znajdowało się wewnątrz przestrzeni, ograniczonej liniami *M Q* i *M' P*. Przestrzeń tę nazywamy *polem widzenia* przedmiotu, odbitego w zwierciedle. Nadmienimy jeszcze, że w razie, gdy przy użyciu zwyczajnych zwierciadeł, obraz niezupełnie dokładnie odpowiada co do kształtu i barwy, przedmiotowi, zależy to od powierzchni odbijającej, którą nadzwyczaj trudno uczynić doskonale płaską i gładką. Niezupełnie płaska powierzchnia odbijająca daje obrazy wykrzywione, wskutek zaś niedostatecznego wypolerowania, nieprawidłowo odbite czyli rozproszone promienie mieszają się z odbitemi prawidłowo i modyfikują barwę obrazu zależnie od barwy materyału, z którego zrobione jest zwierciadło. Oprócz tego, jak zobaczymy niżej, natężenie promienia odbitego jest zawsze mniejsze, aniżeli promienia padającego.

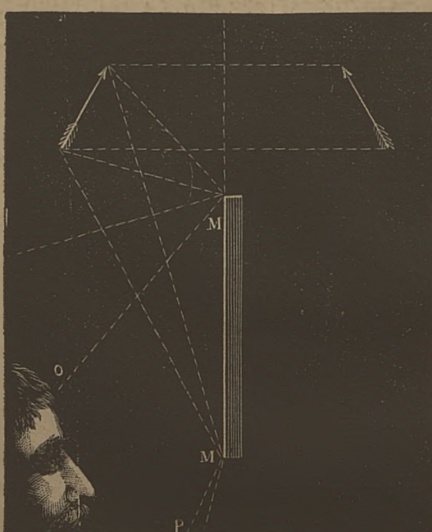


Fig. 266. Zwierciadło płaskie. Wielkość pola widzenia.

Przez połączenie kilku zwierciadeł płaskich można wywołać pewne ciekawe zjawiska, które dają się objaśnić za pomocą

wielokrotnego odbicia światła, podobnie jak objaśniamy podwójne lub potrójne echo przez kilkakrotne odbicie dźwięku. Jeżeli przedmiot O umieścimy pomiędzy dwoma równoległemi zwierciadłami (fig. 267), to z początku powstają w nich obrazy $a_{,}$ i $o_{,}$, które z kolei wywołują obrazy $a_{,,}$ i $o_{,,}$, te wywołują obrazy $a_{,,,}$ i $o_{,,,}$ i t. p. tak, że oko, znajdujące się we właściwym punkcie, dostrzegałoby nieograniczoną liczbę obrazów, gdyby bardziej oddalone nie traciły, wskutek powtarzanego odbicia, tyle na

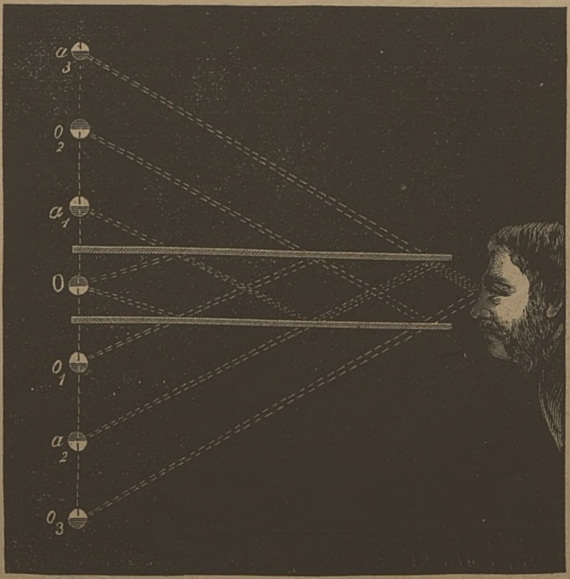


Fig. 267. Wielokrotne obrazy w dwóch równoległych zwierciadłach.

swem natężeniu świetlnem, iż nie wywierają na oko żadnego wrażenia. Gdy przeciwległe ściany salonu utworzone są przez dobre, równoległe zwierciadła, liczba ich pozornie rośnie nieograniczenie wskutek ogromnego mnóztwa obrazów, jakie wtedy dostrzegamy.

Jeżeli zwierciadła płaskie tworzą ze sobą kąt, to liczba obrazów danego przedmiotu jest ograniczona i zależy od stopnia nachylenia zwierciadeł. Fig. 268 (str. 432) przedstawia ilość i układ obrazów przedmiotu, umieszczonego między dwoma pro-

stopadłemi do siebie zwierciadłami; obrazów jest, jak widzimy, trzy, a leżą one na okręgu koła, środek którego znajduje się na linii przecięcia zwierciadeł. Gdy nachylenie wynosi tylko 60°, powstaje pięć obrazów, przy nachyleniu równem 45°, obrazów jest siedem; w ogóle liczba ich wzrasta w miarę zmniejszania kąta nachylenia obu zwierciadeł.

Na przytoczonej tylko co zasadzie opiera się znany powszechnie *kalejdoskop*, wynaleziony przez Brewster'a. Wewnątrz niewielkiej rury znajdują się trzy jednakowo szerokie zwierciadełka szklane, zwrócone powierzchnią odbijającą ku wnętrzu i tworzące razem trójkątny pryzmat równoboczny. Jeden koniec rury jest zamknięty przez dwie równoległe tafelki szklane, z których wewnętrzna jest przezroczysta, zewnętrzna zaś—matowa; pomiędzy temi tafelkami umieszcza się rozmaite przedmioty, jako to: różnobarwne kawałki szkła, perełki, pióra, cienkie druciki, gałązki mchu i t. p. Patrząc przez otwór w denku, zakrywającem drugi koniec rury, widzimy niektóre z tych przedmiotów bezpośrednio, lecz jednocześnie także spostrzegamy ich obrazy w zwierciadełkach, grupujące się w prawidłowe trójpromieniste gwiazdy. Przy obracaniu rury drobne przedmioty, umieszczone pomiędzy tafelkami, grupują się coraz to inaczej i coraz to inne gwiazdy stają się widoczne tak, że różnorodność obrazów jest tutaj niewyczerpana.

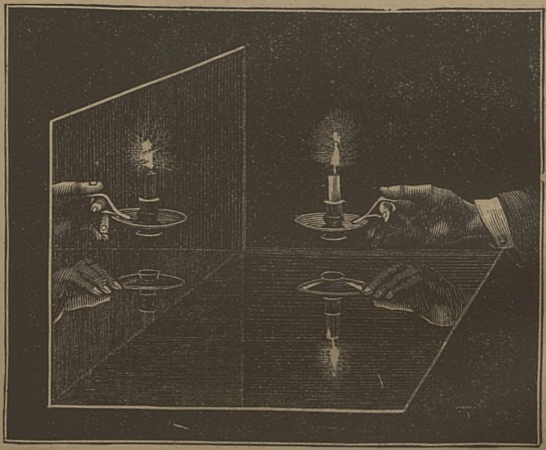


Fig. 268. Obrazy w dwóch zwierciadłach, nachylonych do siebie pod kątem prostym,

Na zakończenie niniejszego § dodamy jeszcze, że zwierciadła szklane, pomimo swej wielkiej kruchości, mają jednak zna-

czną przewagę nad metalowemi, ostatnie bowiem łatwo się utleniają i wymagają wielu starań, podczas gdy szklane przechowują się bez zmiany w ciągu lat całych, jeżeli tylko nie są umieszczone w szczególnie dla nich szkodliwych warunkach, jak np. na wilgotnej ścianie. Im bielsza, albo raczej im bezbarwniejsza jest tafla szklana, tem lepiej nadaje się ona do użycia jako zwierciadło, wtedy bowiem promienie świetlne—które muszą dwa razy przejść przez grubość tafli, zanim po odbiciu od gładkiej powierzchni amalgamatu, pokrywającej tylną jej ścianę, dojdą do oka,—nie ulegają zmianie barwy, ani też żadnemu znaczniejszemu osłabieniu pod względem natężenia światła. Wprawdzie promienie zawsze odbijają się głównie od amalgamatu, część ich jednak odbija się także od przedniej powierzchni szkła, wskutek czego przy uważnem wpatrzeniu się, można dostrzedz przed właściwym obrazem przedmiotu, drugi znacznie słabszy jego obraz, szczególniej gdy patrzymy dość ukośnie na zwierciadło. Dwa te obrazy są tem dalej jeden od drugiego, im grubsze jest szkło zwierciadła. Oprócz tego, nie wszystkie promienie, odbite od amalgamatu, przechodzą zaraz przez szkło, część ich bowiem odbija się od wewnętrznej (odwróconej od amalgamatu) strony szkła, pada na amalgamat i daje nowy obraz. W ten sposób powstaje po za głównym obrazem przedmiotu jeszcze kilka mniej lub więcej wyraźnych, co czyni zwierciadła szklane nie bardzo przydatnemi do poszukiwań naukowych.

§ 3. Sekstant.

Zwierciadła płaskie znalazły bardzo ważne zastosowanie w wielu przyrządach naukowych, jak w *goniometrze*, służącym do mierzenia kątów kryształu, w *heliostacie*, odbijającym w pewnym określonym kierunku światło słoneczne, w *sekstancie*, pozwalającym oznaczyć odległość kątową dwóch punktów dalekich, np. dwóch gwiazd, oraz w wielu innych. Opis wszystkich podobnych przyrządów za daleko odwiódłby nas od celu niniejszego dzieła, dlatego ograniczymy się na jednym z nich, najważniejszym, a mianowicie na *sekstancie*, bez którego oznaczenia astro-

nomiczne na morzu nie mogłyby wcale być dokonywane. Wynalazek tego przyrządu został stopniowo przygotowany przez to, że różni fizycy, jak Newton, Hooke, Godfrey i Harris używali instrumentów mierniczych, które w przybliżeniu polegały na tej samej, co i sekstant zasadzie. Za właściwego jednak wynalazcę tego ostatniego uważać należy Hadley'a, który w r. 1731 pierwszy umożliwił praktyczne zbudowanie zwierciadlanego sekstantu.

Najważniejszą część tego przyrządu stanowią dwa płaskie zwierciadła M i N (fig. 269), zwrócone ku sobie odbijającemi powierzchniami; jedno z nich (N) jest stale umocowane, drugie zaś (M) może być obracane naokoło pionowej swej osi. Przy odpowiedniem położeniu zwierciadła M, padający nań promień $S\ I$, wysyłany przez odległy świecący punkt, odbija się od tego zwierciadła w kierunku $I\ P$ tak, że kąt i pomiędzy powierzchnią odbijającą i promieniem odbitym $I\ P$ jest równy kątowi, jaki tworzy z tąże powierzchnią promień padający $S\ I$. Następnie promień $I\ P$ odbija się od zwierciadła N, poczem przyjmuje kierunek $P\ O$ i dosięga oka obserwatora, znajdującego się przypuszczalnie w O. Patrząc tedy z tego punktu w kierunku $O\ P$, widzimy tamże przez odbicie w zwierciedle N obraz świecącego ciała, z którego promień początkowo wyszedł i znajdującego się właściwie w kierunku $O\ S$ od obserwatora; jednocześnie także oko może widzieć bezpośrednio po przez (w części przezroczyste) zwierciadło N drugie świecące ciało, istotnie znajdujące się w kierunku $O\ P$. Jeżeli tedy przyrząd jest tak ustawiony, że obserwator widzi w tymże kierunku dwie np. gwiazdy: jednę przez podwójne odbicie od zwierciadeł M i N, drugą zaś wprost po przez zwierciadło N, to $S\ O\ P$ stanowi kąt, jaki tworzą z sobą kierunki, po-

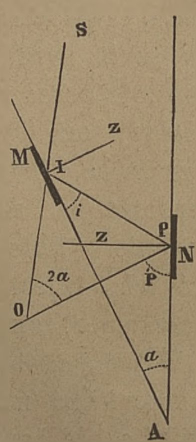


Fig. 269. Objaśnlenie zasady zwierciadlanego sekstantu.

prowadzone od oka do dwóch tych gwiazd. Geometrycznie można dowieść, że kąt $S\ O\ P$ jest zawsze dwa razy większy od kąta a, pod jakim nachylone są do siebie zwierciadła M i N, czyli że $S\ O\ P = 2\ a$.

Mając tedy sposób mierzenia kąta, jaki tworzą z sobą dwa opisane zwierciadła przy podanych wyżej warunkach, możemy łatwo otrzymać kątową odległość dwóch gwiazd czyli kąt, jaki tworzą z sobą linie poprowadzone od nich do oka obserwatora.

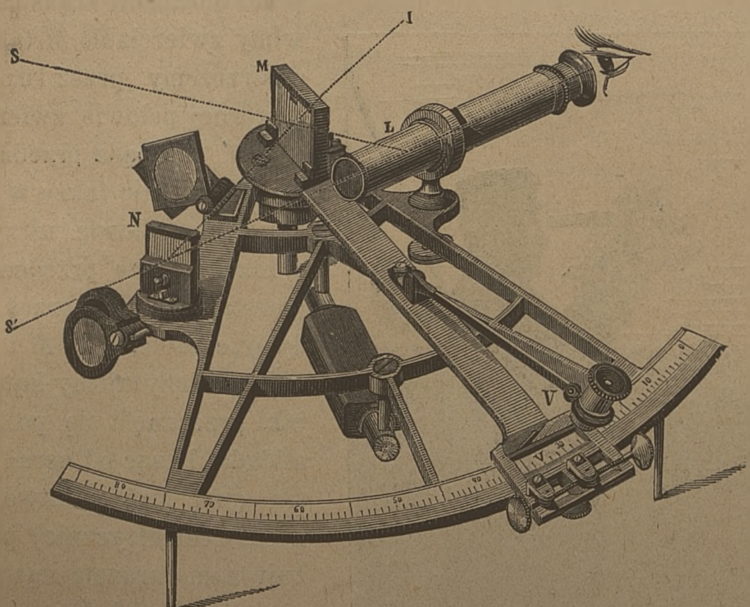


Fig. 270. Sextant zwierciadlany.

Zobaczmy teraz, jak jest urządzony sam przyrząd, przedstawiony w całości na fig. 270. Widzimy tutaj łuk, stanowiący szóstą część koła ([1]), przytwierdzony do mocnej mosiężnej ramy. W środku koła, którego łuk ten jest częścią, znajduje się krążek, który obracając się, przesuwa wskutek tego stale przymocowaną doń płaską linię, tak zwaną alidadę, po łuku. Ta ostatnia kończy się małym przyrządem V—*noniusem*, który umożli-

---

([1]) Od łacińskiego wyrazu *sextus*— szósty, przyrząd nazwano sextantem.

wia bardzo dokładne odczytywanie podziałek skali; nad noniusem widzimy jeszcze szkło powiększające czyli lupę I, przez którą patrzymy na te podziałki. Na drugim końcu alidady znajduje się małe ruchome zwierciadło M, stanowiące jej przedłużenie i prostopadłe do płaszczyzny krążka; gdy alidada stoi na zerze łuku, zwierciadło M jest równoległe do drugiego stałego zwierciadła M'. Na to ostatnie, w górnej połowie przezroczyste, w dolnej zaś amalgamowane, skierowana jest luneta L w taki sposób, że widać przez nią jednocześnie obydwie te części. Gdy przez obracanie krążka ustawimy zwierciadło M tak, że dostrzeżemy przez lunetę w górnej połowie zwierciadła M' jakibądź przedmiot, a jednocześnie także w dolnej jego połowie ujrzymy obraz drugiego przedmiotu, powstający tam przez podwójne odbicie (od M i M'), wtedy odczytujemy kąt, na jaki przesunęła się po łuku alidada, licząc od zera; kąt ten (jak można łatwo dowieść geometrycznie) pokazuje nam zarazem nachylenie zwierciadeł M i M'. Podwajając takowy otrzymujemy, jak już wyżej powiedzieliśmy, kąt $S\,L\,S'$, jaki tworzą z sobą kierunki $L\,S$ i $L\,S'$, prowadzące do dwóch rozpatrywanych przedmiotów.

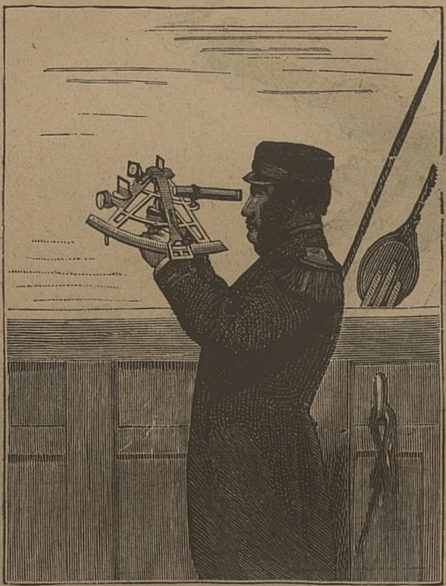


Fig. 271. Obserwacye z sextantem.

Chcąc za pomocą opisanego przyrządu zmierzyć np. kątową odległość dwóch gwiazd, należy go ująć za rękojeść, znajdującą się pod ramą i tak skierować lunetę, ażeby można było dostrzedz jednę z tych gwiazd bezpośrednio przez górną, przezroczystą część zwierciadła M' (fig. 271). Następnie pochylamy ramę przyrządu (przez co nie zmieniamy bynajmniej położenia lunety, al-

bowiem ona wtedy obraca się tylko około podłużnej swej osi) tak długo, dopóki druga gwiazda nie znajdzie się w płaszczyznie tej ramy, a więc i łuku. Wtedy dopiero obracamy krążek, a więc i zwierciadło *M* dopóty, dopóki nie zobaczymy przez lunetę obrazu tej drugiej gwiazdy w dolnej połowie zwierciadła *M'*, które przy przechylaniu ramy również obróciło się tylko około osi, będącej przedłużeniem osi lunety. Podwajając kąt, na jaki przesunęła się alidada wskutek obracania zwierciadła *M*, otrzymujemy szukaną odległość kątową dwóch gwiazd. Gdy chodzi o znalezienie takiejże odległości pomiędzy gwiazdą a księżycem, co jest bardzo ważne dla żeglarzy, albowiem przez to mogą oni określić szerokość geograficzną, pod jaką się znajdują, wtedy postępuje się tak, jak wyżej podano. Dotyczy to również mierzenia kątowej odległości księżyca i słońca, należy tylko używać wtedy szkieł poczernionych, ażeby uniknąć oślepiającego działania promieni słonecznych.

Z pośród innych przyrządów do mierzenia kątowych odległości, sextant wyróżnia się tem, że nie wymaga specyalnego ustawiania, gdyż podczas mierzenia może być, jak widzieliśmy, swobodnie trzymany w ręku. Dlatego właśnie na morzu stanowi on tak nieoceniony przyrząd; dwa niepozorne jego zwierciadełka pozwalają żeglarzowi oryentować się na bezmiernym wód obszarze.

§ 4. Odbicie od zwierciadeł krzywych.

Gdy promienie świetlne padają na zwierciadło krzywe, wtedy odbijają się one wedlug praw, wymienionych wyżej dla zwierciadeł płaskich, należy tylko wyobrazić sobie, że przez każdy punkt, w którym promień spotyka powierzchnię odbijającą, czyli przez punkt padania przechodzi płaszczyzna, dotykająca tejże powierzchni tylko w tym właśnie punkcie i że w nim na owej płaszczyznie wystawiamy normalną. Promienie padający i odbity leżą w jednej płaszczyznie z tą normalną i tworzą z nią kąty równe. Jeżeli rozbieżne promienie padają na taką krzywą powierzchnię, to po odbiciu rozchodzą się silniej lub słabiej, niż

poprzednio, zależnie od wielkości krzywizny, mogą one nawet, jak zobaczymy, stać się równoległemi lub też zebrać się. Dlatego obrazy w krzywych zwierciadłach mają bardzo rozmaity kształt, wielkość i położenie, zależnie od rodzaju krzywizny z jednej strony oraz położenia przedmiotu z drugiej.

Rozważmy z początku obrazy w takich zwierciadłach, które stanowią odcinki kuli i zowią się *kulistemi*. Rozróżniamy dwa ich rodzaje: *zwierciadła wklęsłe*, gdy odbija wewnętrzna powierzchnia kuli i *zwierciadła wypukłe*, gdy zewnętrzna jej powierzchnia jest odbijająca. Fig. 272 przedstawia szematycznie zwierciadło wklęsłe: *A* jestto jego środek, *C*— środek kuli, którego zwierciadło jest odcinkiem, czyli t. zw. środek jego krzywizny; *C A* lub *C I* stanowi promień krzywizny, zawsze prostopadły do powierzchni zwierciadła w punkcie (*A*, *I*), do którego jest doprowadzony. Linia, przechodząca przez środek zwierciadła i środek jego krzywizny, stanowi *główną oś* zwierciadła, każda zaś linia przechodząca przez jakibądź inny punkt zwierciadła oraz punkt *C* stanowi jego *oś boczną*. Promień padający np. *S I*, tworzący z prostopadłą *C I* w punkcie padania kąt *S I C*, odbija się w kierunku *I R* tak, że kąt odbicia *R I C* jest równy kątowi padania *S I C*.

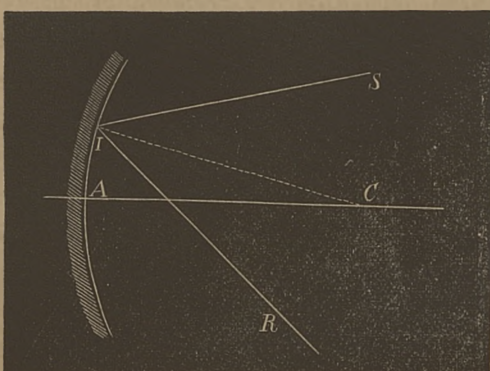


Fig. 272. Zwierciadło wklęsłe.

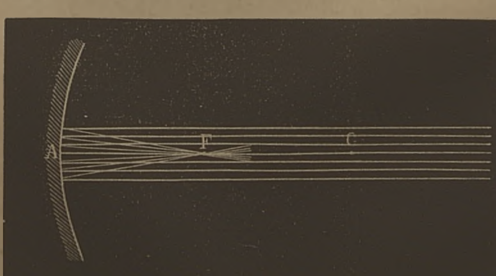


Fig. 273. Główne ognisko zwierciadła wklęsłego.

Przypuśćmy, że punkt świecący znajduje się na głównej osi i w tak wielkiej od zwierciadła odległości, że wszystkie promienie, padające nań z tego punktu, możemy uważać za równoległe do głównej osi (fig. 273, str. 438). Gdybyśmy dla każdego z tych promieni znaleźli kąt padania oraz kierunek, jaki przyjmuje po odbiciu, przekonalibyśmy się, że wszystkie promienie odbite przecinają główną oś w jednym punkcie *F*, który zowie się *głównem ogniskiem* zwierciadła wklęsłego; leży ono na połowie drogi między *A* i *C*. W ognisku głównem powstaje tedy obraz owego odległego punktu na osi; obraz ten jest rzeczywisty, albowiem tworzy się wskutek przecięcia promieni odbitych i można go otrzymać na ekranie. Gdy naodwrót punkt świecący znajduje się w głównem ognisku, to promienie po odbiciu biegną równolegle do osi głównej, a obraz punktu powstaje nieskończenie daleko od nas. Rozważmy teraz wypadek, gdy punkt świetlny znajduje się na głównej osi zwierciadła nie w nieskończenie wielkiej odeń odległości, lecz nieco przed środkiem krzywizny, np. w *S* (fig. 274). Poprowadziwszy promienie padające i znalazłszy kierunek ich po odbiciu, widzimy, że przecinają one oś główną w punkcie *s*, leżącym między ogniskiem głównem i środkiem krzywizny; w *s* tedy powstaje obraz punktu *S*; gdy zaś punkt świecący znajdzie się w *s*, to obraz jego utworzy się w *S*, albowiem kąty odbicia staną się kątami padania i naodwrót. Dlatego też punkty *S* i *s* zowią się *ogniskami sprzężonemi*. W miarę zbliżania punktu świetlnego *S* do środka *C* krzywizny, zmniejsza się kąt padania promieni, a więc odbijają się one także pod mniejszym kątem i ognisko sprzężone *s* zbliża się również do *C*. Wreszcie gdy świecący punkt znajduje się w samym środku krzywizny *C*, wtedy wszystkie promienie padają na zwier-

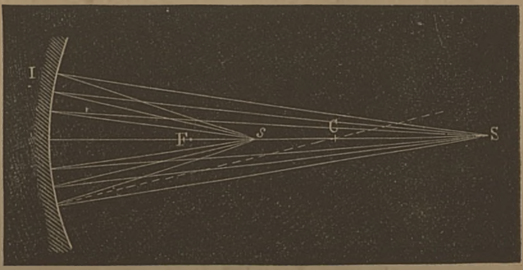


Fig. 274. Sprzężone ogniska.

ciadło prostopadle, a więc odbijają się w tym samym kierunku i ognisko sprzężone tworzy się także w środku krzywizny. Widzieliśmy zaś dopiero co, że ognisko sprzężone dla punktu świetlnego w ognisku głównem, znajduje się w nieskończoności.

Niechaj teraz świecący punkt S znajduje się pomiędzy ogniskiem głównem a zwierciadłem (fig. 275), przyczem $S\,I$ wyobraża jeden z promieni padających. Gdyby w I padał promień, wychodzący z ogniska głównego, to po odbiciu biegłby równolegle do głównej osi, ponieważ jednak promień pada w I pod kątem większym, niż jak gdyby wyszedł z F, to promień odbity $I\,R$ oddala się coraz bardziej od tejże osi, wskutek czego nie przecina jej przed zwierciadłem, lecz przedłużenie jego spotyka oś główną po za zwierciadłem w punkcie s. To samo dotyczy innych promieni, które wychodząc z S, padają na zwierciadło; wszystkie one po odbiciu tworzą wiązkę rozbieżnych promieni, których tylko przedłużenia przecinają się na głównej osi po za zwierciadłem, we wspomnianym punkcie s; punkt taki zowie się *ogniskiem urojonem*, dla odróżnienia od ognisk rzeczywistych, gdzie promienie odbite istotnie się przecinają. Jeżeli oko znajduje się na drodze owych rozbieżnych promieni, będzie mu się zdawało, iż one wychodzą z s, tutaj też zobaczy on obraz punktu świetlnego, podobnie jak to ma miejsce w zwierciedle płaskiem (patrz str. 429). Zobaczmy teraz, w jaki sposób tworzą się obrazy nie pojedyńczych punktów świecących, lecz całych przedmiotów większych rozmiarów. Przypuśćmy, że przedmiot $A\,B$ (fig. 276, str. 441) znajduje się dalej od zwierciadła, niż jego środek C krzywizny. Poprowadźmy najprzód z A promień w kierunku bocznej osi, czyli promień przechodzący przez C, a więc padający prostopadle na zwierciadło; odbija się on, jak wiemy, w tym samym kierunku, w jakim przyszedł; drugi zaś promień z A, biegnący równolegle do głównej osi, przechodzi

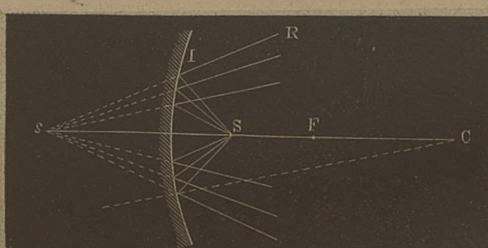


Fig. 275. Ognisko urojone.

po odbiciu przez ognisko główne *F* i przecina się z tamtym promieniem w punkcie *a*. W tym ostatnim przecinają się także inne promienie, wychodzące z *A* tak, że w *a* powstaje obraz punktu *A*. W podobny sposób znajdujemy, że obraz punktu *B* tworzy się w *b*, obrazy zaś wszystkich pośrednich między *A* i *B* punktów, powstają między *a* i *b*, wskutek czego w *a b*, między ogniskiem głównem i środkiem krzywizny, otrzymujemy obraz przedmiotu *A B*, który, jak to widzimy na figurze, jest *rzeczywisty*, *odwrócony* i *zmniejszony*.

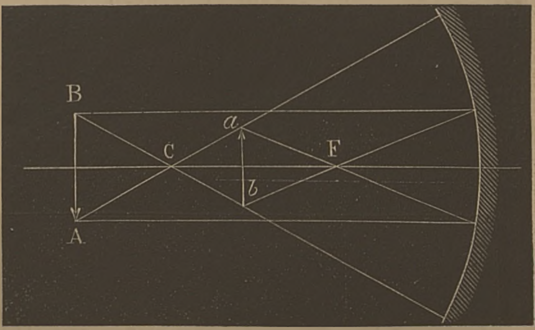


Fig. 276. Szemat tworzenia się obrazu przedmiotu większego niż punkt.

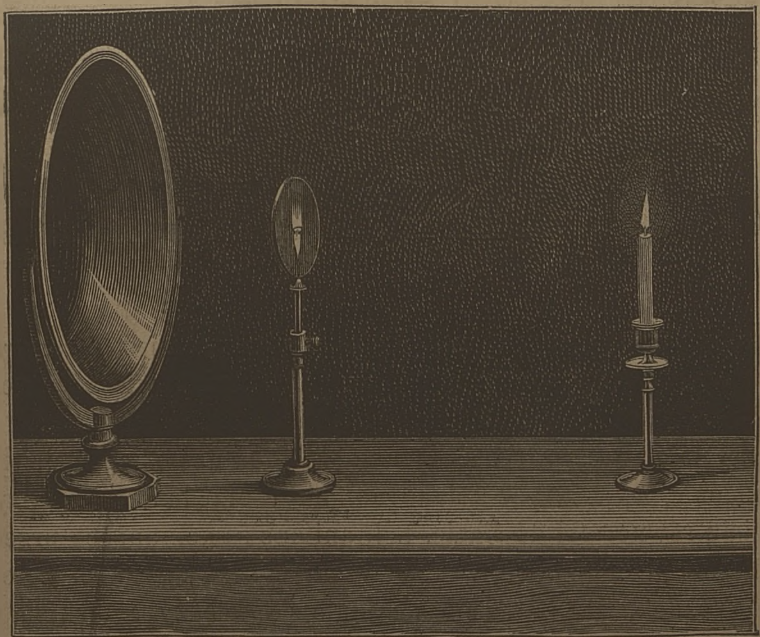


Fig. 277. Rzeczywisty odwrócony i zmniejszony obraz świecy, otrzymany na ekranie.

Jeżeli obserwator znajduje się wprost zwierciadła tak, że promienie, rozbiegające się z *a b*, wpadają do jego oka, wtedy widzi

on obraz w powietrzu przed zwierciadłem; stojący zaś z boku obrazu nie dostrzegają; w razie zaś, gdy w miejscu, gdzie powstaje obraz, ustawimy ekran (fig. 277, str. 441), to promienie padające na ten ostatni, odbijają się od niego we wszystkich kierunkach i obraz na ekranie widziany jest ze wszech stron. Podobne doświadczenie, które należy urządzać w mocno przyciemnionym pokoju, może nam także pokazać, że gdy przedmiot świecący znajduje się pomiędzy ogniskiem głównem a środkiem krzywizny, wtedy obraz tworzy się w punkcie bardziej oddalo-

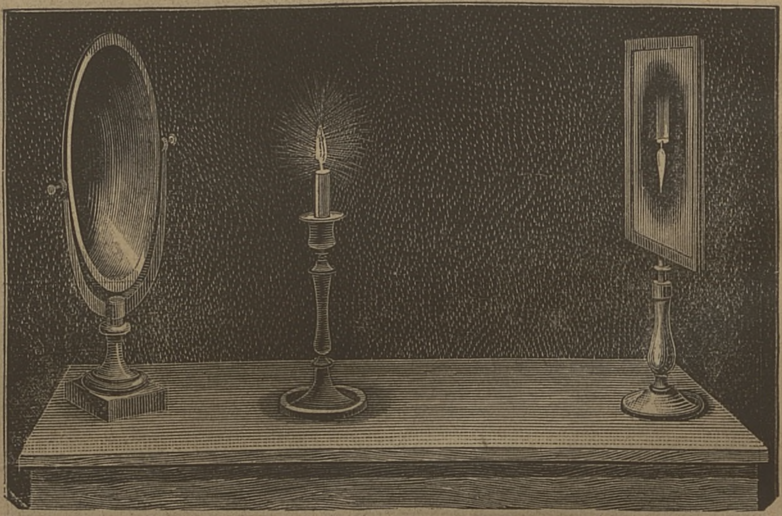


Fig. 278. Rzeczywisty, odwrócony i powiększony obraz przedmiotu, umieszczonego między głównem ogniskiem i środkiem krzywizny wklęsłego zwierciadła.

nym od zwierciadła, niż tenże środek; obraz ten jest *rzeczywisty*, *odwrócony* i *powiększony* (fig. 278). Przedmiot świecący, postawiony w samem ognisku głównem, wcale nie daje obrazu, albo raczej daje go w nieskończenie wielkiej od nas odległości, gdyż promienie, wychodzące z danego punktu przedmiotu, biegną po odbiciu równolegle do siebie, t. j. ani one same, ani ich przedłużenia nie przecinają się wcale. Wreszcie rozważmy jeszcze ostatni wypadek, gdy przedmiot znajduje się między ogniskiem głównem i zwierciadłem (fig. 279, stronica 443). Poprowadziwszy z punktu *A* promień równoległy do głównej osi oraz promień w kierunku osi bocznej, widzimy, iż po odbiciu dwa te promienie nie

przecinają się przed zwierciadłem, lecz przedłużenia ich spotykają się po za niem w punkcie *a*, który jest urojonym obrazem *A*. To samo stosuje się do punktu *B* oraz wszystkich pozostałych tak, że w *a b* powstaje obraz *urojony*, *prosty* i *powiększony* przedmiotu *A B*. Rezultat ten łatwo sprawdzić, stawiając, jak wyżej, w ciemnym pokoju zapaloną świecę przed zwierciadłem wklęsłem, bliżej niż jego ognisko główne; zobaczymy wtedy w zwierciedle powiększony i prosty obraz świecy (fig. 280), który jest urojony, tak jak w zwierciedle płaskiem, nie może więc być otrzymany na ekranie.

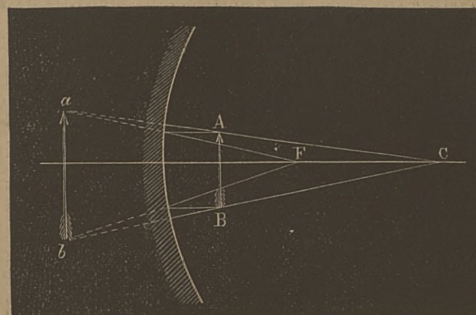


Fig. 279. Szemat tworzenia się urojonego obrazu.



Fig. 280. Urojony, prosty i powiększony obraz przedmiotu, umieszczonego między głównem ogniskiem i zwierciadłem wklęsłem.

W zwierciadłach kulistych wypukłych obrazy są zawsze urojone, albowiem promienie, z których się składa wiązka padającego na nie światła, rozbiegają się po odbiciu, jak to uwidocznia fig. 281, str. 444. Niechaj *A B* przedstawia przedmiot, umieszczony przed wypukłem zwierciadłem. Poprowadźmy z *A* i *B* promienie równoległe do głównej osi, a po odbiciu będą one miały taki kierunek, że tylko przedłużenia ich po za zwierciadłem przetną oś w punkcie *F*,

który stanowi *urojone ognisko główne* zwierciadła wypukłego; to samo stosuje się do innych promieni równoległych do osi. Następnie poprowadźmy z A i B promienie prostopadłe do zwierciadła w punkcie padania, a zobaczymy, że i one także po odbiciu nie przetną osi, lecz tylko przedłużenia ich spotkają się z nią w środku C krzywizny. Promienie tedy, wychodzące z A, po odbiciu od zwierciadła, rozbiegają się tak, jak gdyby przychodziły z punktu a, leżącego po za zwierciadłem; to samo stosuje się do promieni z B tak, że więc $a\ b$ stanowi obraz przedmiotu $A\ B$. W miarę, jak przysuwamy przedmiot do zwierciadła wypukłego, urojony jego prosty obraz powiększa się i zbliża do tylnej powierzchni tegoż zwierciadła, zawsze jednak jest on mniejszy od przedmiotu, jak to widać na fig. 281.

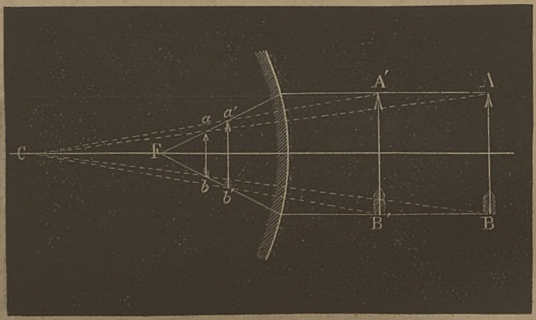


Fig. 281. Zwierciadło wypukłe. Obraz jest urojony, prosty i mniejszy od przedmiotu.

Jeżeli zwierciadło posiada względnie duże rozmiary, jak np. posrebrzone kule, używane często jako ozdoba w ogrodach, wtedy odbicia otaczających przedmiotów są dziwacznie powykrzywiane, a to dlatego, że części odleglejsze są bardziej zmniejszone i zdają się leżeć dalej w tyle po za powierzchnią odbijającą, aniżeli części bliższe.

Musimy tu zauważyć, że promienie odbite od zwierciadła kulistego, wtedy tylko dość dokładnie przecinają się w jednym punkcie, gdy padają niezbyt daleko od jego głównej osi i dlatego też zwierciadłu takiemu nie należy nadawać zbyt wielkich rozmiarów. Gdy warunek ten nie jest zachowany, wtedy wprawdzie promienie równoległe do osi i odbite w blizkości środka A (fig. 282, str. 445) przecinają oś w ognisku głównem F, lecz promienie, padające w punkcie O, dla których kąt padania jest o wiele większy, przecinają oś w F', to jest bliżej zwierciadła; zboczenie $F\ F'$ zowie się *aberracyą kulistości.* Wynika z tego, że promienie od-

bite przecinają się tak, że nie wszystko światło koncentruje się w jednem miejscu, lecz tworzy się powierzchnia, wierzchołek której znajduje się w ognisku głównem i tutaj też jest ona najsilniej oświetlona; powierzchnia ta (przecięcie jej widzimy na fig. 282) zowie się *kaustyką.* Trzymając przed zwierciadłem wklęsłem, mniej więcej w kierunku jego osi, arkusz papieru, otrzymujemy na nim przecięcie tej powierzchni, przedstawiające się jako świetlna linia, zwana linią ogniskową. Do podobnych doświadczeń nadają się także walcowate zwierciadła wklęsłe, półkoliste brzegi metalowe lub też wewnętrzne ściany szklanych naczyń. Na pełniwszy szklankę w części jaką nieprzezroczystą cieczą, naprzykład mlekiem, kawą, a najlepiej atramentem i wystawiwszy ją na działanie promieni słonecznych, które z góry padają ukośnie na jej wewnętrzną ścianę, otrzymujemy bardzo wyraźną linię ogniskową na powierzchni cieczy (fig. 283). Wskutek aberracyi kulistej, obrazy większych przedmiotów są bardzo niewyraźne, często też używa się przy zwierciadłach kulistych przepon czyli diafragm, które nie przepuszczając promieni peryferycznych (bardziej oddalonych od głównej osi), dają możność otrzymywania obrazów, mniej wprawdzie jasnych, lecz za to wyrazistszych.

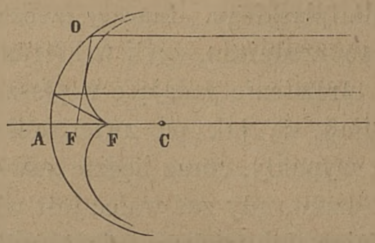


Fig. 282. Aberracya kulistości. Kaustyka przez odbicie.



Fig. 283. Linia ogniskowa, otrzymana na powierzchni cieczy.

Zwierciadła wklęsłe lub wypukłe, stanowiące odcinki walca, odbijają światło w taki sposób, że wymiary odbijającego się

przedmiotu nie ulegają zmianie w kierunku długości walca, albowiem w kierunku tym zwierciadła są płaskie, to znaczy, że idące po sobie elementy powierzchni odbijającej leżą jakby na jednej prostej linii. Dlatego też promienie, odbite wzdłuż jednego i tego samego boku walca biegną tak, jak gdyby odbiły się od zwierciadła płaskiego. Inaczej rzecz się ma w kierunku prostopadłym do poprzedniego, czyli w kierunku poprzecznego przecięcia walca: promienie padające w płaszczyznie tego samego przecięcia odbijają się jak od zwierciadła kulistego tak, że gdy walec jest wypukły, obraz będzie zawsze miał mniejszą szerokość, niż przedmiot, gdy zaś walec jest wklęsły, szerokość obrazu będzie mniejsza lub większa, niż szerokość przedmiotu, zależnie od położenia tego ostatniego względem zwierciadła. Podobnie i obrazy w zwierciadłach stożkowatych są zmienione w kierunku obwodu stożka; ponieważ przytem krzywizna obwodów oddzielnych poprzecznych przekrojów powiększa się, idąc od podstawy do wierzchołka, to i zmiana obrazu będzie tem większa, im bliżej wierzchołka; jeżeli stożkowate zwierciadło jest wypukłe, to zmiana polega na zmniejszeniu szerokości obrazu.

Gdy światło odbija się od przezroczystej tafli zwierciadlanej, wtedy obrazy wydają się nieco blade, albowiem znaczna część padającego światła przechodzi przez taflę, nie uległszy wcale odbiciu; z tego mianowicie powodu pokrywa się tafle zwierciadlane amalgamatem cyny lub też srebrem, przez co obrazy stają się tak wyraźne, jak gdyby były odbite w doskonale polerowanej powierzchni nieprzezroczystego ciała. Zwierciadeł nieamalgamowanych używa się natomiast do wywoływania pewnych efektownych zjawisk, jak np. do ukazywania duchów na scenie. Polegają one na tem, że dana osoba, odpowiednio ubrana i silnie oświetlona, której widzowie dostrzedz nie mogą, gdyż jest ukryta w zagłębieniu poniżej sceny (fig. 284), odbija się w zwierciedle przezroczystem, zawieszonem pochyło przed samą sceną. Ta ostatnia, również jak i sala, są słabo oświetlone tak, że widzowie nie dostrzegają samego zwierciadła, lecz widzą tylko obraz odbitej w niem osoby oraz aktorów, znajdujących się po za zwierciadłem na scenie.

Jeżeli powierzchnia danego ciała jest doskonale wypolerowaną, to wszystkie padające na nią promienie odbijają się podług omówionych wyżej praw i powstaje, jak widzieliśmy, obraz przedmiotu wierny lub skrzywiony, zmniejszony lub powiększony i t. p. Sama powierzchnia odbijająca zdaje się nie wysyłać promieni i jest dla nas tem mniej widoczna, im lepiej jest wypolerowana. W słabo oświetlonym pokoju nie widzimy samych zwierciadeł, lecz tylko odbite w nich przedmioty; gdybyśmy mogli np. spoglądać z księżyca na ziemię, morza jej wydawałyby się zapewne ciemne i tylko w miejscu, gdzie odbija się obraz słońca, wi-

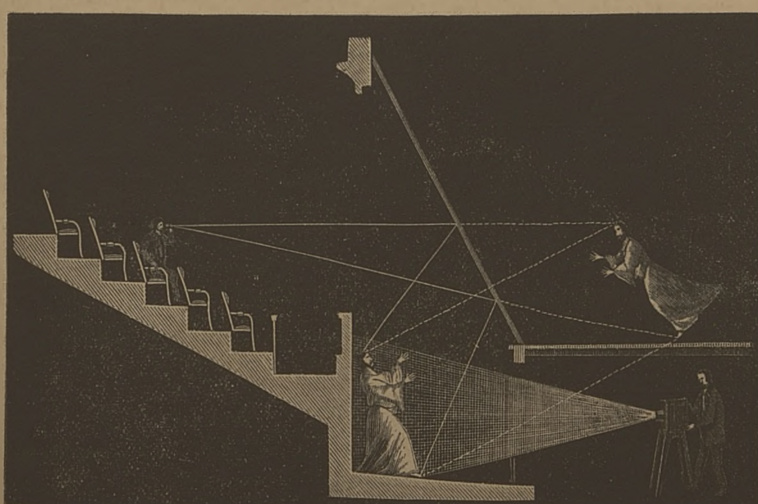


Fig. 284. Położenie zwierciadła przy ukazywaniu duchów na scenie.

dzielibyśmy jasno oświetlony krążek. Ponieważ księżyc przedstawia się nam jako powierzchnia we wszystkich swych punktach oświetlona, wnosimy z tego, iż niema na nim znacznych obszarów wodnych.

Jeżeli tedy same powierzchnie zwierciadeł są dla nas widoczne, zależy to od niezupełnej ich gładkości; wtedy bowiem część padającego na nie światła odbija się nieprawidłowo na wszystkie strony, t. j. zostaje rozproszona, tak, jak przez ciała chropawe, które w wysokim stopniu posiadają tę własność. Gdy powiadamy, że światło rozproszone jest nieprawidłowo odbite, nie

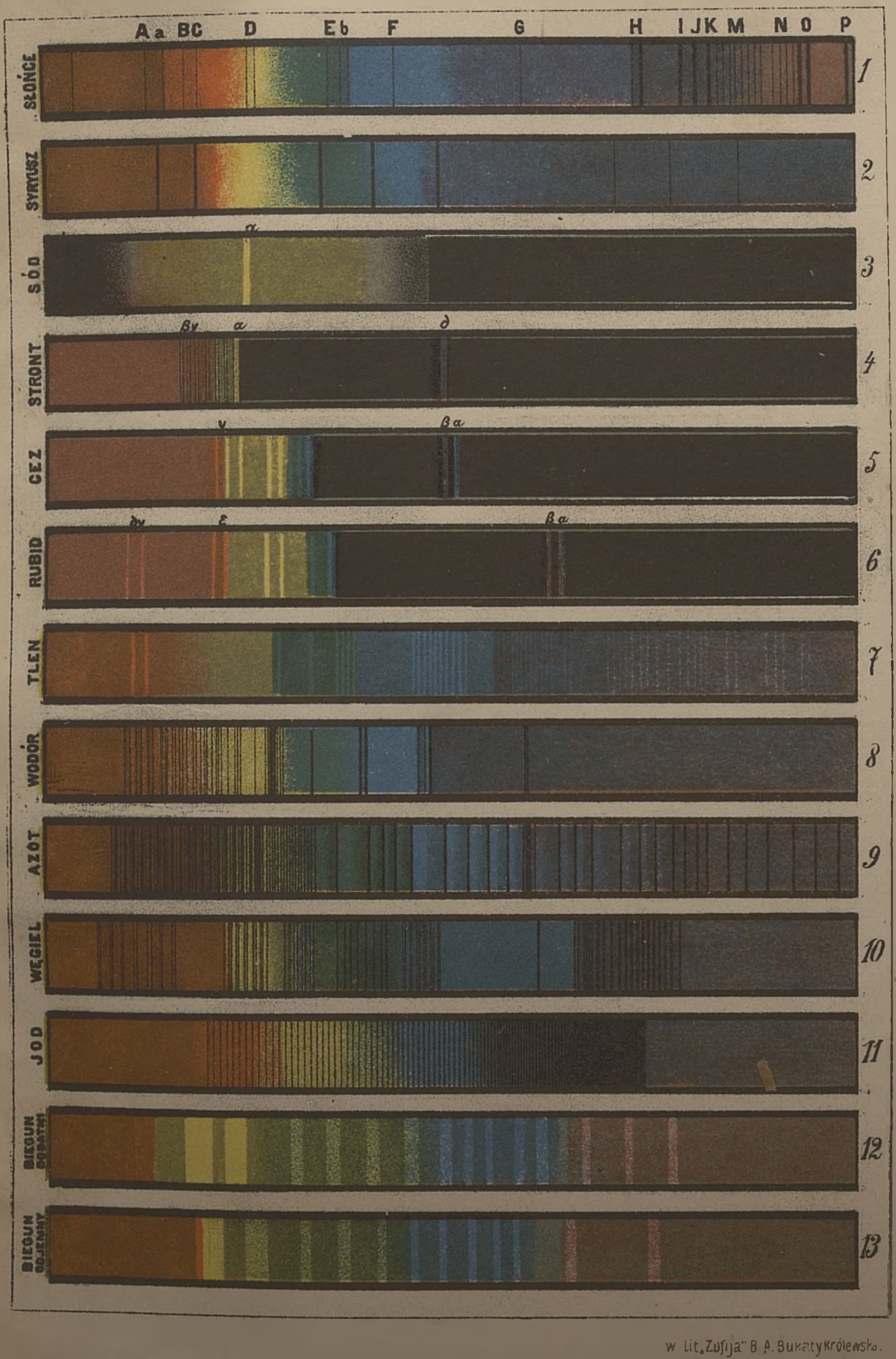
znaczy to, że ono ulega innym prawom odbicia, niż te, które wyżej opisaliśmy; nieprawidłowość polega na tem, że nierówności powierzchni mają kierunek najrozmaitszy i odbijają światło pod najrozmaitszemi też kątami (fig. 285).

Wiadomo, że jedno i to samo ciało może stanowić zwierciadło, albo odbijać nieprawidłowo, zależnie od stopnia politury: polerowane szkło zamienia się w zwierciadło, matowe zaś rozprasza tylko światło; to samo stosuje się do marmuru i innych minerałów, do rogu, kości słoniowej, niektórych gatunków drzewa i wielu innych ciał. Siła odbitego światła zależy także od kąta padania; tak np. gdy kąt ten równa się 50^0, woda odbija 72 procent, szkło 54 pr., marmur 60 pr., rtęć i metalowe zwierciadło 70 pr. padającego światła. Jeżeli kąt padania się powiększa, ilość odbitych promieni maleje nadzwyczajnie przy dwóch pierwszych z wymienionych tutaj ciał tak, że wynosi ona tylko 2—3 pr., gdy np. kąt padania dochodzi prawie do 90^0, podczas gdy rtęć w tych warunkach odbija jeszcze 60 pr. światła. Ciała ciemne w słabym stopniu odbijają światło; tak np. ilość promieni, odbitych od sadzy, nawet błyszczącej, jest nader nieznaczna.



Fig. 285. Nieprawidłowe odbicie światła od chropawej powierzchni.

Niewiele więcej jak sto lat temu poczęto stosować prawa odbicia do przesyłania na odległość oraz spotęgowania blasku świateł, palących się na latarniach morskich, które w nocy chronią okręty od niebezpieczeństw, grożących im w blizkości brzegów ze strony ostrych skał, ławic piaskowych i t. p., oświetlając drogę do bezpiecznego portu. W dawniejszych czasach palono w tym celu na wieżach ognie, później dopiero pomyślano o tem, ażeby ognie zastąpić lampami; wreszcie dodano do lamp zwierciadła z polerowanego metalu, od których promienie światła odbijały się w przestrzeń daleką. Lecz latarnie te o wklęsłych



II. Widma różnych źródeł światła:

1) słońca, 2) gwiazdy stałej, 3—11) niektórych pierwiastków chemicznych, 12—13) światła elektrycznego na obu biegunach.

zwierciadłach, czyli *latarnie katoptryczne*, pozostawiały dużo do życzenia, po pierwsze dlatego, że same lampy były bardzo niedoskonałe, powtóre zaś, że zwierciadła wklęsłe kuliste, w ognisku głównem których ustawione jest światło, nie odbijają go pod postacią snopa równoległych promieni, biegnącego w pewnym żądanym kierunku, lecz rozpraszają je mniej lub więcej, zależnie od swej wielkości. Czytelnik bowiem rozumie zapewne, że tak samo, jak promienie równoległe, padające na względnie duże zwierciadło (patrz str. 445), nie przecinają się wszystkie po odbiciu w ognisku głównem, tak też i promienie, wychodzące z ogniska głównego, odbijają się tak, że biegną potem jako snop rozbieżnych promieni. Dopiero gdy podług wskazówek inżyniera Teulera, zastąpiono zwierciadła kuliste *parabolicznemi*, t. j. odcinkami paraboloidów, latarnie morskie dosięgły wielkiego znaczenia. Zwierciadła paraboliczne dokładniej, niż kuliste, skupiają promienie równoległe w jednem ognisku, co wynika z geometrycznych własności paraboli; naodwrót także, promienie wychodzące z ogniska paraboli, po odbiciu są dokładnie równoległe tak, że natężenie ich mało się zmienia w miarę odległości, albowiem nie rozpraszają się one na coraz większej przestrzeni. Zwierciadło paraboliczne działa tedy odnośnie do światła w podobny sposób, jak trąbka akustyczna odnośnie do dźwięku, a zmniejszenie natężenia, które wreszcie następuje, pochodzi ztąd, że promienie przechodzą przez powietrze, gdzie zostają częściowo pochłonięte, szczególniej podczas mgły. Obecnie używane latarnie katoptryczne składają się zwykle z grupy lamp, z których każda znajduje się w ognisku parabolicznego metalowego zwierciadła. Ponieważ lampy wraz ze swemi zwierciadłami obracają się za pomocą przyrządu zegarowego około pionowej osi, to podczas całkowitego obrotu spostrzega się w jakim oddalonym punkcie kilka razy pojawiające się światło, w przerwach zaś panuje tam ciemność.

Zwierciadła paraboliczne mogą przesyłać światło na bardzo znaczną odległość; podług badań Biot'a i Arago, światło odbite od takiego zwierciadła 81 cm. szerokiego, było widziane przez lunetę, przy sprzyjającej pogodzie, jeszcze na odległości 24 mil

geograficznych. Pomimo to jednak strata na sile oświetlającej wcale nie jest mała, wynosi bowiem co najmniej połowę promieni, padających na zwierciadło; oprócz tego, powierzchnia zwierciadeł metalowych psuje się dość prędko od par zawierających sole i napełniających ustawicznie powietrze w blizkości morza. Z tych powodów zarzucono nieco w nowszych czasach system latarń katoptrycznych, używając ich głównie do oświetlania wązkich odnóg morskich lub cieśnin, albo też do powiększenia siły innego, potężniejszego źródła światła. W latarniach morskich pierwszorzędnych znalazł zastosowanie system inny, który poznamy w końcu następnego rozdziału.

ROZDZIAŁ IV.

Załamanie światła (Dioptryka).

§ 1. Ogólne zjawiska i prawa załamania.

Gdy koniec prostego drążka zanurzymy w czystej wodzie, nadając mu przytem położenie pochyłe względem powierzchni cieczy, wówczas wydaje się on nam jakby złamany w miejscu, w którem wchodzi do wody, zanurzona zaś jego część wydaje się podniesioną i skróconą. Gdy trzymamy drążek prostopadle do powierzchni wody, albo gdy stajemy tak, że nie dostrzegamy jego pochylenia, wtedy załamanie znika dla naszych oczu i tylko skrócenie zanurzonej części jest jeszcze wyraźne. Doświadczenie podobne można łatwo wykonać, zanurzając np. ołówek w szklance wody. Albo też ustawmy przed sobą nieprzezroczyste naczynie, na dnie którego znajduje się np. niewielka moneta *a* i umieśćmy oko tak, ażebyśmy tej ostatniej nie mogli dostrzedz (fig. 286), t. j. ażeby promień *a d c*, idący od monety, przechodził powyżej oka (*b*). Po nalaniu wody do naczynia, ujrzymy monetę, pomimo iż oko nie zmieniło swego położenia: będzie się nam zdawało, że moneta się podniosła, że znajduje się w *m* (fig. 287). Każdy zresztą łatwo może zauważyć, że przedmioty, wi-

dziane po przez warstwę wody, zdają się być zmienione pod względem kształtów i leżeć w innem miejscu, niż to, w jakiem istotnie się znajdują. Wszystkie podobne zjawiska zależą od tego, że światło, przechodząc z jednego środka do drugiego, z wody np. lub szkła do powietrza, *zmienia swój kierunek*, to jest zbacza z dotychczasowej drogi czyli, jak powiadamy, *załamuje się*.

Gdy światło rozchodzi się ze świecącego lub oświetlonego punktu, wtedy w środku jednorodnym rozprzestrzenia się, jak wiemy, prostolinijnie; po przejściu do drugiego, również jednorodnego środka, biegnie tak samo prostolinijnie, lecz ta ostatnia droga nie stanowi przedłużenia pierwszej, a całkowity kierunek promienia przedstawia się jako linia złamana, obydwie części której tworzą kąt, mający swój wierzchołek na granicy obu środków. Powtarza się to przy każdem przejściu światła z jednego środka do drugiego, niezależnie od tego, czy są one stałe, ciekłe lub gazowe; wielkość zaś zboczenia zależy od natury tego drugiego środka. Zjawisko załamania światła było zapewne znane od najdawniejszych czasów, albowiem tak często narzuca się uwadze ludzkiej, iż trudno go nie dostrzedz; nawet niektórzy starożytni astronomowie, jak np. Ptolomeusz, znali wpływ załamania w atmosferze, to jest zboczenie, jakiemu ulega promień świetlny, gdy z t. zw. próżnej przestrzeni przechodzi przez warstwy atmosfery ziemskiej. Lecz przyczynę tego zboczenia oraz prawa załamania wykrył dopiero w początku XVII stulecia holenderski matematyk Snellius. Zajmijmy się tedy zbadaniem

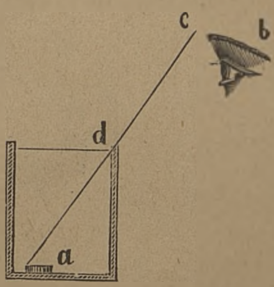


Fig. 286. Moneta (*a*) niewidoczna dla oka.

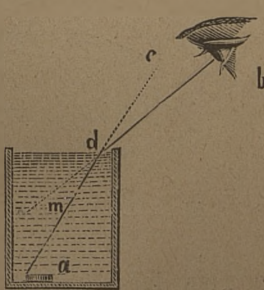


Fig. 287. Pozorne podniesienie monety w naczyniu z cieczą.

tych praw, oznaczanych także mianem praw Kartezyusza, który zgłębił je dokładniej i nadał im bardziej określone znaczenie.

Fig. 288 przedstawia przyrząd, służący do doświadczeń nad załamaniem światła. Składa się on z pionowo osadzonego koła, podzielonego na stopnie, do którego przymocowane jest szklane naczynie, mające kształt krótkiego lecz szerokiego walca, którego oś jest pozioma i przechodzi przez środek koła. Po napełnieniu tego ostatniego naczynia do połowy wodą lub inną jaką

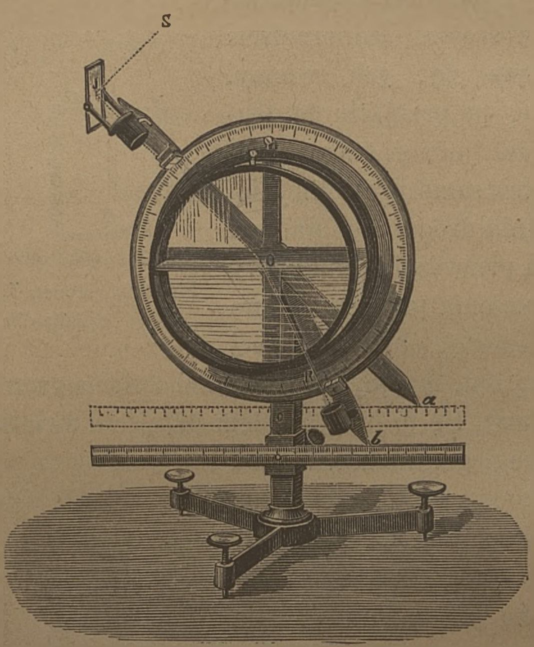


Fig. 288. Przyrząd do doświadczeń nad załamaniem światła.

cieczą, poziom jej sięga wysokości środka koła, a normalna do tego poziomu zlewa się z pionową jego średnicą. Do środka koła przymocowany jest płaski, dający się obracać liniał (alidada); na górnym jego końcu widzimy krótką rurkę, od której odchodzą dwa ramiona, podtrzymujące ruchome zwierciadło płaskie, drugi zaś koniec rurki, bliższy koła, jest zamknięty przez dno, posiadające mały otwór. Zwierciadło należy tak ustawić, ażeby padający nań promień słoneczny po odbiciu przeszedł przez otwór

i trafiał punkt powierzchni cieczy, znajdujący się dokładnie naprzeciwko środka O koła. W tem miejscu promień przenika do wnętrza cieczy i opuszcza takową w określonym punkcie dolnej części naczynia. W celu dokładnego określenia kierunku wychodzącego promienia, umieszcza się obok pierwszego liniału drugi, zaopatrzony na końcu w taką samą rurkę, zakrytą przez dno o małym otworze; oprócz tego, na każdym liniale znajduje się wskaźnik, posuwający się wzdłuż stopni koła i pozwalający dokładnie odczytywać położenie danego liniału. Ustawmy najprzód zwierciadło i górną rurkę tak, ażeby promień po odbiciu od zwierciadła padał prostopadle na powierzchnię wody w punkcie O, a przekonamy się, że po przejściu przez wodę, wyjdzie on z dolnej rurki tylko wtedy, gdy ta ostatuia znajduje się na jednej prostej pionowej ze środkiem O, z czego wynika, *że promień, padający prostopadle do powierzchni odgraniczającej dwa środki nie załamuje się, lecz biegnie dalej w tym samym kierunku.*

Następnie zmieńmy położenie zwierciadła i górnej rurki tak, ażeby promień padający w punkcie O tworzył z normalną pewien kąt, a zobaczymy, że wtedy i promień wychodzący z wody tworzy z tą normalną *kąt załamania*, mniejszy od *kąta padania*, lecz powiększający się wraz z tym ostatnim. W każdem jednak położeniu promień załamany wtedy tylko trafia na otwór w dolnej rurce, gdy obadwa otwory leżą w jednej płaszczyznie z normalną do powierzchni cieczy w punkcie padania, z czego wynika następujące prawo: *promień padający i promień załamany leżą w jednej płaszczyznie, prostopadłej w punkcie padania do powierzchni, rozdzielającej dwa środki.* Ażeby módz oznaczać stosunek kąta padania do kąta załamania, zaopatruje się dolny koniec każdego liniału w ostrze, przesuwające się wzdłuż poziomej ruchomej skali z podziałkami, przyczem ostrza znajdują się na jednakowej odległości od środka O koła. Ustawiwszy przyrząd tak, ażeby promień, który przenika przez otwór w górnej rurce i pada w punkcie O na powierzchnię wody, przechodził po załamaniu przez dolny otwór, mierzymy odległość ostrzy a i b od normalnej do powierzchni cieczy w punkcie padania, a to przez posuwanie w górę skali aż do a i następne jej

opuszczanie do *b*. Powtarzając takie mierzenia przy rozmaitych kątach padania i załamania, przekonywamy się, że stosunek rzeczonych odległości, dla jednego i tego samego środka załamującego, jest ilością stałą. Należy tutaj nadmienić, że odległości ostrzy *a* i *b* od normalnej dają jednocześnie miarę tego, co w trygonometryi oznaczamy jako *wstawy* odpowiednich kątów, w danym wypadku—kątów padania i załamania tak, że stosunek tych odległości daje nam zarazem stosunek wstaw rzeczonych kątów. Gdy np. powyższe doświadczenia wykonywamy z wodą, znajdujemy zawsze, niezależnie od kąta padania, że odległość ostrza *a* od normalnej jest 1,335 razy większa, niż takaż odległość ostrza *b;* stosunek tedy wstawy kąta padania do wstawy kąta załamania dla powietrza i wody jest jak 1,335 do 1. Dla innych dwóch środków znajdujemy stosunek odmienny, lecz także stały; np. dla powietrza i siarku węgla wynosi on 1,67; dla powietrza i alkoholu—1,37 i t. d. Zauważmy mimochodem, że zarzut, jaki możnaby zrobić przeciwko opisanym doświadczeniom, a mianowicie, iż promień, wychodzący z cieczy, ulega powtórnemu załamaniu przy przejściu przez dno naczynia usuwa się tem, że, jak to widać z fig. 288, każdy promień wewnątrz cieczy, jako prostopadły do walcowatej powierzchni dna, przechodząc przez takowe, nie ulega wcale załamaniu. Możemy więc wyniki tych doświadczeń ująć w następujące prawo: *stosunek wstawy kąta padania do wstawy kąta załamania jest dla dwóch danych środków ilością stałą.* Stosunek ten zowie się *spółczynnikiem załamania.* Jeżeli promień przechodzi ze środka mniej gęstego optycznie do bardziej gęstego optycznie, to spółczynnik załamania jest większy od jedności, innemi słowy, kąt załamania jest mniejszy od kąta padania, gdyż promień załamany zbliża się do normalnej. I tak spółczynnik załamania dla wody odnośnie do powietrza wynosi, jak powiedzieliśmy wyżej $^4/_3$, dla szkła równa się on $^3/_2$, dla dyamentu $^5/_2$. Jeżeli zaś promień przechodzi z próżni do danego środka, wtedy spółczynnik jego załamania zowie się absolutnym; dla ciał stałych i ciekłych absolutny spółczynnik załamania różni się bardzo mało od spółczynnika odnośnie do powietrza i dlatego ten ostatni przyjmujemy za ich spółczynnik załamania.

Znając drogę promienia przy przejściu z jednego środka do drugiego, łatwo zrozumieć, że ten sam promień, wychodząc z drugiego środka do pierwszego, musi odbyć tę samą drogę, lecz w kierunku przeciwnym. Chcąc przedstawić to w sposób szematyczny, nakreślmy promień *R I* (fig. 289), padający na powierzchnię wody w punkcie *I* i przedłużmy go, to jest zaznaczmy drogę, po jakiej biegłby, gdyby nie uległ załamaniu; następnie promieniem, równym jedności, zakreślmy z punktu *I* koło. Widzimy, że to ostatnie przecina przedłużenie promienia padającego w punkcie *R'*; jeżeli tedy z tego punktu poprowadzimy prostopadłą *R' P'* do normalnej, to daje nam ona wstawę kąta padania. Długość *R' P'* skróćmy w stosunku spółczynnika załamania dla powietrza i wody, a więc prawie zupełnie dokładnie w stosunku 4 : 3 i znajdźmy na okręgu koła taki punkt *S*, którego odległość *S P* od normalnej równa się skróconej linii, co łatwo można wykonać na drodze geometrycznej; wtedy *S P* jest wstawą kąta załamania, a połączywszy punkt *I* z punktem *S*, otrzymujemy promień załamany *I S*. Przeciwnie gdy promień wychodzi z wody w kierunku *S I*, to w powietrzu biegnie dalej w kierunku *I R*, inaczej mówiąc, przy przejściu z wody do powietrza promień oddala się od normalnej. W ogóle przechodząc ze środka optycznie bardziej gęstego *A* do środka optycznie mniej gęstego *B*, promień oddala się od normalnej i spółczynnik załamania równa się odwrotnemu spółczynnikowi przy przejściu z *B* do *A*; tak np. przy przejściu z wody do powietrza wynosi on $^3/_4$, ze szkła do powietrza $^2/_3$, z dyamentu do powietza $^2/_5$.

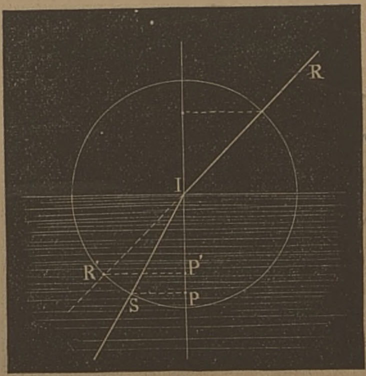


Fig. 289. Prawo załamania.

Prawa te załamania zdają sprawę ze zjawisk, opisanych na początku niniejszego §. Ażeby np. oko *b* (patrz fig. 287, str. 451) ujrzało monetę, znajdującą się na dnie naczynia, promienie

świetlne, odbite od niej, muszą dojść do powierzchni wody i wyjść w powietrze, tutaj jednak, oddalając się od normalnej w punkcie padania, przyjmują kierunek bardziej pochyły, wskutek czego dochodzą do oka, które widzi monetę w kierunku przedłużenia tych promieni.

To samo stosuje się do części drążka, znajdującej się pod wodą: cała zanurzona część wydaje się nieco wzniesiona i jakby zgięta względem części, wystającej z wody (fig. 290). W podobny sposób objaśnia się także, dlaczego gdy patrzymy ukośnie na powierzchnię stawu lub jeziora, zawierającego przezroczystą wodę, wydają się one płytsze, aniżeli są w rzeczywistości.

§ 2. Zupełne wewnętrzne odbicie. Załamanie światła przy zjawiskach astronomicznych.

Gdy przy przejściu ze środka mniej gęstego do bardziej gęstego kąt padania się powiększa, wzrasta także kąt załamania,

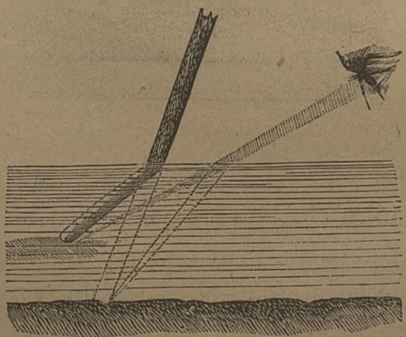


Fig. 290. Objaśnienie zjawiska załamania.

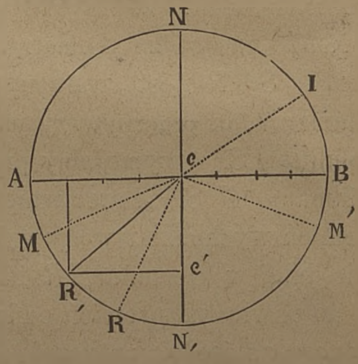


Fig. 291. Graniczny kąt padania.

lecz nie tak szybko, jak pierwszy. Znajdźmy kierunek promienia załamanego, gdy promień padający na powierzchnię wody, tworzy z normalną kąt prosty (90°), to jest gdy pada np. na punkt c (fig. 291) wzdłuż samej powierzchni $B\ A$, oddzielającej oba środki; wtedy linia $N\ c$, lub też równa jej $B\ c$ jest wstawą kąta padania $N\ c\ B$, jeżeli koło zakreślone z punktu c, ma pro-

mień równy jedności. Niechaj wstawa ta równa się czterem jednakowym częściom. Ponieważ spółczynnik załamania dla powietrza i wody wynosi $^4/_3$, to w naszym przykładzie promień w wodzie utworzy z normalną kąt, którego wstawa powinna równać się trzem takim samym częściom; warunkowi temu odpowiada promień *c R'*, tworzący z normalną kąt *N' c R'*, mniejszy od prostego. A więc gdy kąt padania zmienia się od 0⁰ do 90⁰, kąt załamania zmienia się od 0⁰ do pewnej granicy, mniejszej niż 90⁰; kąt załamania, odpowiadający kątowi padania—90⁰, zowie się *granicznym*. Dla wody wynosi on 48⁰ 35′, dla szkła 41⁰ 48′, dla dyamentu 23⁰ 35′.

Zobaczmy teraz, co zachodzi, gdy promienie przechodzą ze środka bardziej gęstego do mniej gęstego, np. z wody do powietrza. Gdy promień biegnie w wodzie wzdłuż normalnej *N' c*, wtedy, przechodząc do powietrza, posuwa się wzdłuż normalnej *N c*, czyli nie ulega załamaniu; w miarę jednak powiększania kąta padania w wodzie, powiększa się także kąt załamania w powietrzu, lecz daleko szybciej niż pierwszy (jak to widać np. na promieniach *R c* i *I c*). Jeżeli kąt padania stanie się równym

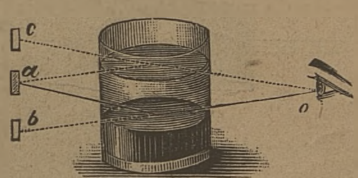


Fig. 292. Obrazy widziane wskutek zwykłego odbicia i zupełnego wewnętrznego odbicia.

granicznemu *N' c R*, wtedy promień załamany będzie się ślizgał po samej powierzchni *A B*. Nareszcie w razie, gdy jakiś promień *c M* pada pod kątem większym od granicznego, wtedy wcale nie wychodzi z wody, lecz odbija się od powierzchni *A B*, tworząc z normalną kąt odbicia *M' c N'* równy kątowi padania *M c N'*. Tutaj całkowita ilość światła odbija się i dlatego zjawisko to zowie się *zupełnem wewnętrznem odbiciem*, przy mniejszych bowiem kątach padania na powierzchnię *A B*, część tylko światła odbija się i powraca, inna zaś przechodzi do drugiego środka. Następujące proste doświadczenie pokazuje zupełne wewnętrzne odbicie: nalejmy do szklanego naczynia rtęci, a nad nią wody, następnie umieśćmy w *a* (fig. 292), na jednakowej odległości od poziomów rtęci i wody, jakiś przedmiot. Patrząc nań z *o* przez naczynie, widzimy dwa

jego obrazy: jeden *b* wskutek zwykłego odbicia od powierzchni rtęci, drugi *c* wskutek zupełnego wewnętrznego odbicia od powierzchni wody. Albo napełnijmy szklankę wodą i trzymajmy ją tak, ażeby poziom cieczy znajdował się nieco wyżej, niż oko nasze, a wtedy powierzchnia wody wyda nam się błyszczącą i srebrzysto-białą, jak zwierciadło metalowe i ujrzymy w niej bardzo dokładne obrazy przedmiotów zanurzonych w cieczy, albo też umieszczonych z boku, nieco niżej poziomu. Za pomocą zupełnego wewnętrznego odbicia tłómaczymy również fakt, dlaczego światło nie przenika do ciemnego pokoju, gdy w otworze jego okiennicy znajduje się szklany trójgraniasty pryzmat, którego dwie płaszczyzny są do siebie prostopadłe, trzecia zaś nachylona jest do każdej z nich pod kątem 45° i gdy otwór zamknięty jest przez jednę z płaszczyzn, tworzących z sobą kąt prosty (fig. 293). Promienie padające prostopadle na przednią powierzchnię, przechodzą przez nią niezałamane i padają pod kątem 45° na przeciwległą ukośną powierzchnię. Ponieważ graniczny kąt dla szkła wynosi 41° 48′, to promienie te ulegają zupełnemu wewnętrznemu odbiciu, poczem padają na trzecią płaszczyznę pryzmatu, przez którą wprawdzie przechodzą, lecz tworzą tak wązką smugę światła wzdłuż ściany pokoju, że ten ostatni właściwie nie jest wcale przez nie oświecony; przez załamanie zaś, przy powyżej podanem ustawieniu pryzmatu, ani jeden promień do pokoju nie przenika.

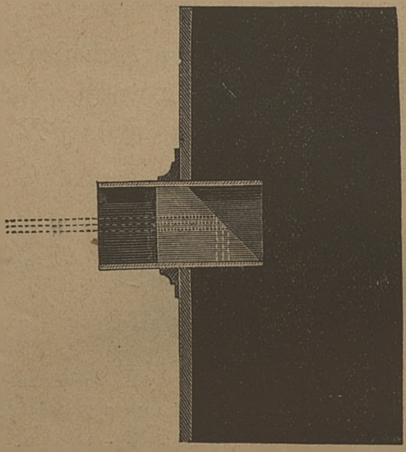


Fig. 293. Zupełne wewnętrzne odbicie światła przy przejściu przez prostokątny trójgraniasty pryzmat.

Ponieważ światło słońca, księżyca i gwiazd, które przybywa do nas, przechodzi z t. zw. przestrzeni próżnej do atmosfery ziemskiej, składającej się z warstw powietrza zmiennej gę-

stości, to ulega ono ciągłemu załamywaniu, dlatego też gwiazd nie widzimy (1) nigdy w kierunku linii prostych, łączących istotne ich miejsce z okiem, znajdującem się np. w *o* (fig. 294), wyjąwszy tylko te, które leżą dla nas w zenicie, promień bowiem padający prostopadle na atmosferę, nie ulega załamaniu, jak to ma miejsce np. dla gwiazdy *a*. Inaczej się dzieje z gwiazdą *b*: światło jej przechodzi ukośnie przez warstwy atmosfery coraz to gęstsze i ulega ciągłemu załamywaniu; kierunki załamanego promienia tworzą razem linię krzywą (2) i obserwatorowi w *o* gwiazda *b* przedstawia się w kierunku ostatniego załamania, zobaczy

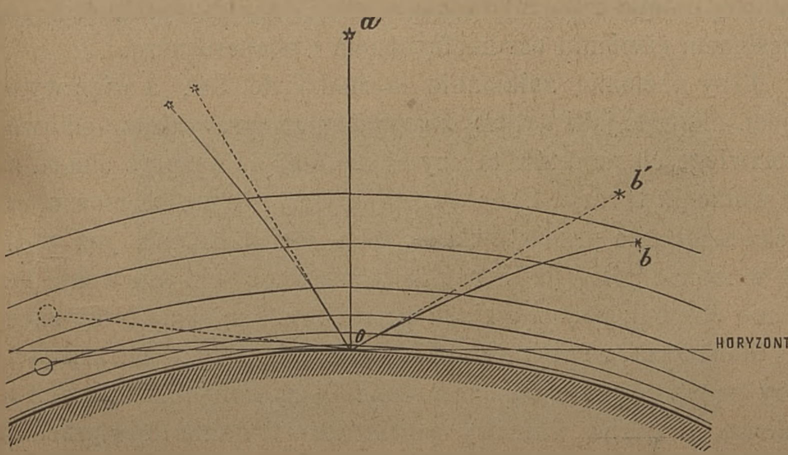


Fig. 294. Załamanie światła przy zjawiskach astronomicznych.

ją tedy w *b'*, a więc bliżej zenitu czyli wyżej nad horyzontem, niż w rzeczywistości. Największego zaś załamania doznają promienie, wychodzące od gwiazd, leżących przy samym horyzoncie, te bowiem muszą przechodzić przez najgrubszą warstwę atmosfery. Wielkość załamania przy zjawiskach astronomicznych zależy nietylko od wysokości gwiazdy nad poziomem, ale także od

---

(1) Patrz także wpływ aberracyi światła (str. 422).

(2) Linia ta właściwie jest łamana, z powodu jednak nieznacznie wzrastającej gęstości powietrza, możemy ją uważać za krzywą.

gęstości, grubości i rozmieszczenia warstw powietrznych, a ponieważ nie można zbadać dokładnie tych ostatnich warunków, należałoby wyrzec się ścisłego oznaczenia rzeczonego załamania, gdyby nie można go było dokonać za pomocą samych obserwacyj astronomicznych. Te ostatnie pozwalają mianowicie na każdą chwilę obliczyć wysokość nad horyzontem, na jakiej widzielibyśmy gwiazdę, gdyby nie było załamania, a różnica pomiędzy obliczoną wysokością a tą, jaką otrzymujemy patrząc na gwiazdę, daje nam wielkość załamania, jakiemu uległ promień przy przejściu przez atmosferę. Brano także pod uwagę stan barometru i termometru, dopiero też po długich i starannych badaniach udało się ułożyć tablice załamania dla danych wysokości, przy określonem ciśnieniu barometrycznem i temperaturze.

Przy poziomie załamanie dochodzi do 34′, a więc wynosi więcej, niż kąt, jaki tworzą z sobą linie, poprowadzone od dwóch przeciwległych punktów tarczy słonecznej do naszego oka (t. zw. kąt widzenia tarczy sł.). Gdy znajdujemy się np. na morzu, cała tarcza słoneczna przedstawia się nam nad poziomem już wtedy, gdy w istocie górny jej brzeg do właściwego poziomu wcale jeszcze nie doszedł; podobne zjawisko ma także miejsce przy zachodzie słońca tak, że wskutek załamania, niezależnie od zmroku— który powstaje przez odbicie promieni słonecznych, idących z pod poziomu, o górne warstwy powietrza—trwanie dnia przedłuża się, a wielkość tego przedłużenia zależy od danego punktu na ziemi. Tak np. pod naszą szerokością geograficzną (około 52°) dzień jest przedłużony prawie o 8 minut. W czasie całkowitego zaćmienia księżyca, promienie słoneczne tak się w atmosferze ziemskiej załamują, że część ich dosięga księżyca i dlatego też nie znika on wtedy dla nas zupełnie, widzimy go jeszcze w słabem czerwonem świetle. Planeta Wenus, rozpatrywana przez lunetę, przedstawia tarczę w części tylko oświetloną, co zależy od jej położenia względem słońca; w wyjątkowych tylko wypadkach, gdy przechodzi przed tarczą słońca, widać ją na tle tej ostatniej jako czarną kulę. Otóż w r. 1882 podczas przejścia Wenery przed tarczą słońca, spostrzeżono wokoło planety pier-

ścień jasny, który może pochodzić tylko od załamania promieni słonecznych w atmosferze, otaczającej Wenerę ([1]).

§ 3. Załamanie światła w środkach, ograniczonych płaszczyznami równoległemi i nierównoległemi.

Gdy po przez szklaną płytę o ścianach równoległych będziemy patrzyli na jaki świecący punkt w kierunku prostopadłym do tychże ścian, wtedy zobaczymy punkt ów w tem samem miejscu, w jakiem istotnie się znajduje, przeciwnie—przy uko-

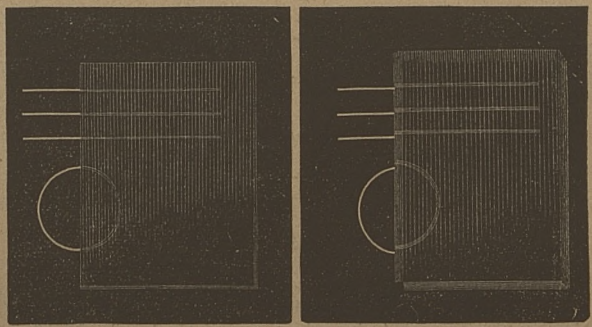


Fig. 295. Przesunięcie promieni przy przejściu ich przez środek ograniczony płaszczyznami równoległemi.

śnem patrzeniu, punkt wyda się przesunięty. Można to łatwo stwierdzić za pomocą następującego prostego doświadczenia: Nakreślmy na papierze kilka linii i nakryjmy je w części szklaną płytą (fig. 295); patrząc na papier prostopadle, zobaczymy, że części linii, zakryte przez szkło, stanowią przedłużenie linii, widzianych bezpośrednio (strona lewa), gdy zaś spoglądamy ukośnie, linie wydają się przerwane na granicy szkła; części pod niem leżące (strona prawa) wydają się jakby przesunięte w górę.

([1]) Jędrzejewicz—„Kosmografia".

Przesunięcie to jest tem większe, im ukośniej patrzymy na płytę, im grubsza jest ta ostatnia, oraz im większy jest jej spółczynnik załamania. Płyty cienkie, jak np. nasze szyby okiennic, powodują tylko nader nieznaczne przesunięcie promieni świetlnych tak, że przez nie widzimy przedmioty w ich właściwem miejscu.

Z fig. 296 czytelnik zrozumie wpływ takiego środka (niechaj to będzie jeszcze szkło) o ścianach równoległych na bieg przechodzącego przezeń promienia. Gdy ten ostatni pada w kierunku *S' R*, wtedy po wejściu do szkła ulega załamaniu i zbliża się do normalnej *N' R;* wychodząc ze szkła w punkcie *I*, załamuje się powtórnie, *oddalając się od normalnej N I o tyleż, o ile poprzednio zbliżył się do N' R*. Promień wychodzący *I S* pozostaje równoległym do promienia wchodzącego *S' R*, nie stanowiąc wszakże jego prostolinijnego przedłużenia. Widzimy tedy, że istotnie promień nie ulega zboczeniu od pierwotnej drogi, lecz tylko bocznemu przesunięciu. To ostatnie nie ma miejsca, gdy promień pada prostopadle na szkło, wtedy bowiem przechodzi przez nie bez załamania. Doświadczenie pokazuje także, że jeżeli promienie przechodzą przez kilka środków, których wszystkie powierzchnie są równoległe do siebie, to z ostatniego wychodzą one równolegle do kierunku, jaki posiadały przed wejściem do środka pierwszego.

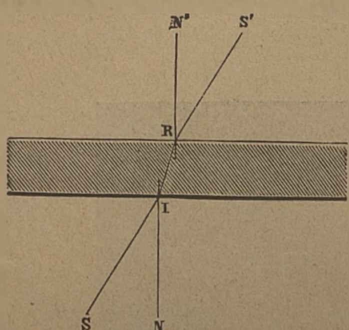


Fig. 296. Droga promienia przebiegającego środek, ograniczony płaszczyznami równoległemi.

Rozważmy teraz wypadek, gdy promień przechodzi przez środek, ograniczony płaszczyznami nierównoległemi. Jeżeli np. promień *S C* (fig. 297) wchodzi z powietrza do środka bardziej odeń gęstego *B*, wówczas załamuje się i zbliża do normalnej *m n* w punkcie padania, poczem biegnie w kierunku *C D;* wycho-

dząc napowrót w powietrze, znów się załamuje i oddala od normalnej *p q* w punkcie wyjścia. Widzimy, że kierunek promienia wychodzącego *D E* nie jest równoległy do pierwotnego—*S C*.

W optyce każdy przezroczysty środek ograniczony płaszczyznami nierównoległemi, nazywamy *pryzmatem;* kąt, utworzony przez płaszczyznę pryzmatu, na którą pada promień i tę, z której wychodzi, zowie się *kątem załamującym;* krawędź, gdzie przecinają się dwie te płaszczyzny, jestto *krawędź załamująca* czyli *wierzchołek* pryzmatu; płaszczyzna zaś, przeciwległa wierzchołkowi, nazywa się *podstawą pryzmatu.* Figura 298, str. 464 przedstawia szklany pryzmat, zwykle używany do doświadczeń; z boku oddzielnie przedstawione jest jego t. zw. *przecięcie główne*, otrzymane przez przekrój pryzmatu płaszczyzną, prostopadłą do jednej z trzech jego krawędzi; jak widzimy, przedstawia ono trójkąt, którego każdy kąt może być uważany jako załamujący. Pryzmat umieszcza się zwykle na stosownej podstawce, na której można mu nadawać rozmaite położenie, zależnie od celu doświadczenia.

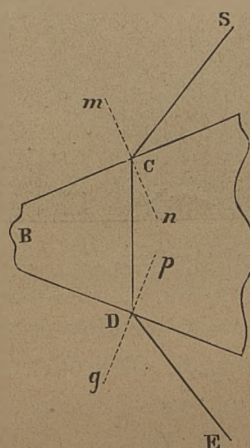


Fig. 297. Droga promienia przez środek ograniczony płaszczyznami nierównoległemi.

Niechaj *B A C* (fig. 299, str. 464) przedstawia główne przecięcie szklanego pryzmatu, *A*—jego wierzchołek, *B C*—podstawę. Promień *R T*, padający w płaszczyźnie głównego przecięcia, po wejściu z powietrza do pryzmatu zbliża się do normalnej *T N* i biegnie w kierunku *T T';* wychodząc z pryzmatu w powietrze, oddala się od normalnej *T' N'* i biegnie w kierunku *T' S*. Kąt *S D E*, na jaki zmienia się kierunek padającego pro-

mienia, zowie się *kątem odchylenia pryzmatu.* Promień tedy, przechodząc przez pryzmat, bardziej gęsty, niż środek otaczający, *zostaje odchylony ku podstawie.* Oko, umieszczone na drodze wychodzącego promienia, zobaczy przedmiot, z którego promień pierwotnie wyszedł, w kierunku $S\,T'$, a więc bliżej wierzchołka pryzmatu. Można się o tem przekonać, umieszczając pomiędzy okiem a zapaloną świecą, szklany pryzmat tak, ażeby jego krawędź załamująca była pozioma i zwrócona do góry; płomień świecy wyda się wtedy wzniesiony (fig. 300, str. 465); gdy zaś krawędź załamująca zwrócona jest ku dołowi, płomień wydaje się obniżony.



Fig. 298. Pryzmat i jego przecięcie główne.

Przeciwnie, jeżeliby pryzmat był zrobiony z substancyi, słabiej załamującej, niż środek otaczający, natenczas *odchylałby on promienie ku wierzchołkowi* i widziane przezeń przedmioty wydawałyby się obniżone ku podstawie. Im większy jest kąt załamujący pryzmatu, tem większe jest, przy tym samym kącie padania, odchylenie promieni. Jeżeli zaś dla jednego i tego samego pryzmatu zmienia się kąt padania, wtedy zmienia się także kąt, pod jakim promień ten opuszcza drugą płaszczyznę, a więc także—kąt odchylenia; wreszcie możemy dojść do kąta granicznego, przy którym, jak już wiemy, następuje zupełne wewnętrzne odbicie; w tym wypadku promień

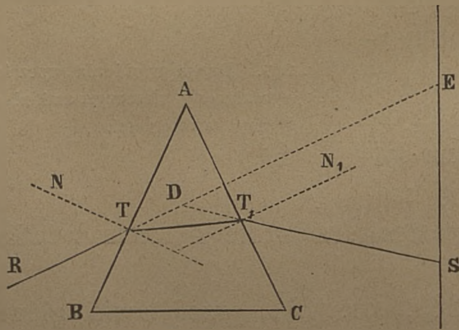


Fig. 299. Droga promienia, przechodzącego przez pryzmat gęstszy, niż środek otaczający.

z pryzmatu wcale nie wyjdzie (patrz str. 458). Przy jakim zaś kącie padania podobne zjawisko ma miejsce, zależy to od spółczynnika załamania tej substancyi, z której zrobiony jest pryzmat oraz od jego kąta załamującego.

Umieśćmy teraz na drodze wiązki *S* promieni słonecznych szklany pryzmat *B A C* tak, ażeby część ich przeszła mimo krawę-

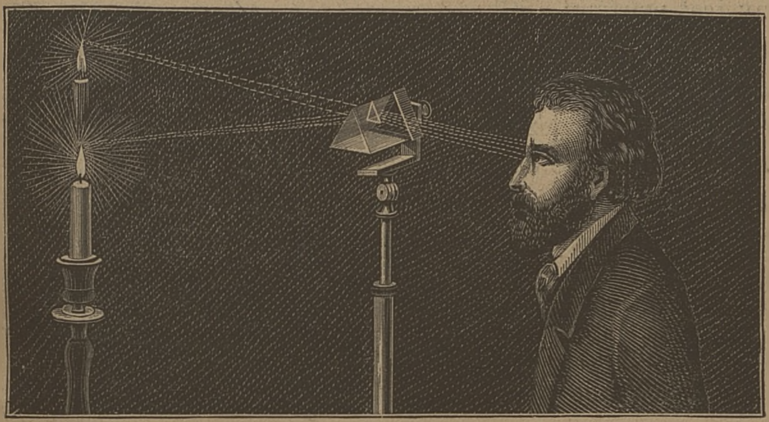


Fig. 300. Obrazy przedmiotów, widzianych przez szklany pryzmat.

dzi *A* i zachowała pierwotny swój kierunek *A D* (fig. 301), inna zaś ażeby została załamaną i odchyloną w kierunku *A E*. Jak powiedzieliśmy wyżej, kąt odchylenia *D A E* zmienia się wraz z kątem, pod jakim padają promienie na pryzmat. Otóż obracając ten ostatni w jedną lub drugą stronę, można znaleść takie jego położenie, przy którem odchylenie, to jest kąt *D A E* jest *mniejsze*, aniżeli przy każdem innem. Gdy wyprowadzamy pryzmat z tego swoistego położenia, odchylenie zawsze się powiększa, zupełnie niezależnie od tego, w jaką stronę go obracamy, a więc także bez względu na to, czy pro-

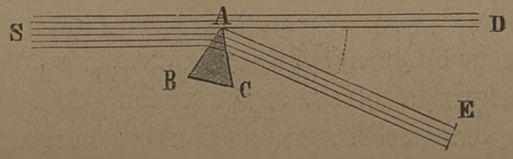


Fig. 301. Najmniejsze odchylenie pryzmatu.

mienie padają nań ukośniej lub mniej ukośnie, niż w położeniu *najmniejszego odchylenia.* Otóż za pomocą mierzenia można się przekonać, że najmniejsze odchylenie ma miejsce wtedy, gdy *kąt wejścia do pryzmatu jest równy kątowi wyjścia.* Najmniejsze odchylenie pryzmatu jest bardzo ważne dla praktycznej optyki; znając takowe oraz kąt załamujący, można z wielką dokładnością oznaczyć spółczynnik załamania substancyi, z której zrobiony jest pryzmat. Chcąc znaleść ten spółczynnik dla danego ciała, należy przygotować zeń pryzmat, zmierzyć za pomocą kątomiaru jego kąt załamujący, a następnie określić przez doświadczenie kąt najmniejszego odchylenia; po dokonaniu tego, mamy już dane, potrzebne do obliczenia żądanego spółczynnika. Zauważymy jeszcze, że gdy w zadaniu takiem chodzi o ciało płynne, wtedy napełnia się niem naczynie, którego dwie przeciwległe ściany, nachylone do siebie pod pewnym kątem, utworzone są przez płaskie, starannie wyszlifowane tafelki szklane, ograniczone płaszczyznami równoległemi. Oto spółczynniki załamania dla niektórych środków: *dyament*—2,47 do 2,75; *krownglas*—1,5; *flintglas* (szkło, zawierające tlenek ołowiu)—1,6; *alkohol*—1,37; *woda*—1,33; *cukier lodowaty*—1,53; *lód*—1,31.

§ 4. Załamanie światła w soczewkach.

Kawałek szkła lub innego jakiego przezroczystego ciała, ograniczony dwiema krzywemi powierzchniami, stanowi instrument optyczny, zwany *soczewką.* Jako przykład może służyć przyrząd, otrzymany z dwóch szkiełek zegarkowych, złożonych w ten sposób, że wypukłe ich powierzchnie są zwrócone na zewnątrz; tworzą one wtedy soczewkę dwuwypukłą. Zobaczymy wkrótce, że istnieją rozmaite rodzaje soczewek, lecz dwuwypukła czyli t. zw. *lupa*, jest najbardziej rozpowszechniona i oddaje nieocenione usługi badaczom przyrody oraz pracownikom na polu przemysłu i sztuki. Można przyjąć z dostateczną pewnością, że soczewki i ich własność powiększania obrazów przedmiotów są znane od bardzo dawna: w gruzach Herkulanum i Pompei znaleziono ciała, które zaledwie można uważać za co innego, jak za

lupy. Okulary, również nie będące niczem innem, jak soczewkami, są używane w Europie już od początku IV stulecia. Lecz zaledwie trzy wieki upłynęły od czasu, jak prawa załamania światła zostały poznane o tyle dokładnie, że pozwoliły odpowiednio kombinować różne szlifowane szkła, przez co dopiero można było otrzymać bardzo ważne, nieznane do owej chwili, rezultaty. Nazwa soczewki została przez fizyków uogólnioną do wszystkich przezroczystych ciał, ograniczonych z jednej przynajmniej strony przez krzywą powierzchnię, niezależnie od tego, czy jest ona wypukła, czy też wklęsła. W większości wypadków obydwie powierzchnie są kuliste, albo też jedna jest kulista, druga zaś płaska; takie soczewki nazywamy kulistemi. Pod względem kierunku, jaki soczewki nadają promieniom, przez nie przechodzącym, można je podzielić na dwie główne grupy: na *zbierające*, które skupiają promienie oraz *rozpraszające*, czyniące te ostatnie bardziej rozbieżnemi. Z pierwszych najważniejszą jest lupa, ograniczona, jak już powiedzieliśmy, dwiema powierzchniami wypukłemi, mającemi zwykle jednakową krzywiznę; następnie idzie soczewka *płasko-wypukła*, której jedna strona jest krzywa, druga płaska; wreszcie używa się jeszcze soczewka *wklęsło-wypukła*, o jednej powierzchni wypukłej, drugiej wgłębionej, tak jednak, że krzywizna pierwszej jest większa, niż drugiej

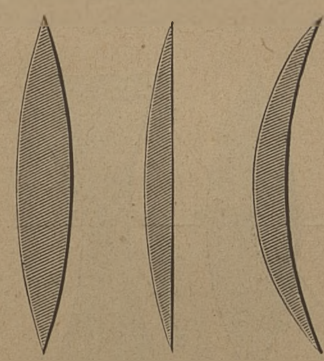


Fig. 302. Soczewki zbierające: dwuwypukła, płaskowypukła i wklęsłowypukła.

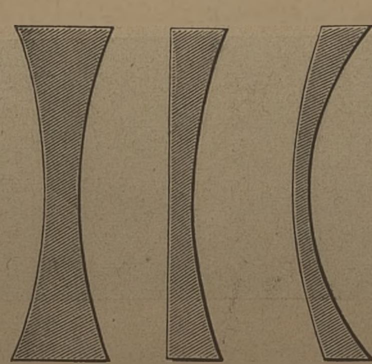


Fig. 303. Soczewki rozpraszające: dwuwklęsła, płasko-wklęsła i wypukło-wklęsła.

Fig. 302 (str. 467) przedstawia w przecięciu trzy wymienione rodzaje soczewek. Na fig. 303 widzimy w przecięciu soczewki rozpraszające, mianowicie *dwuwklęsłą* o obu powierzchniach wgłębionych, *płasko-wklęsłą* o jednej powierzchni wgłębionej, drugiej zaś płaskiej i *wypukło-wklęsłą*, której jedna powierzchnia jest wgłębiona, druga zaś wypuklona, przyczem jednak krzywizna wgłębionej jest większa. Linia prosta, łącząca środki kul, których powierzchnie te stanowią odcinki, czyli t. zw. środki krzywizny, zowie się *główną osią* soczewki; jeżeli jedna z powierzchni jest płaska, wtedy główną oś otrzymuje się, gdy ze środka krzywizny drugiej powierzchni prowadzi się linię prostopadłą do owej płaskiej. W soczewkach zbierających główna oś przechodzi przez najgrubszą część, w rozpraszających zaś przez najcieńszą część soczewki (fig. 304).

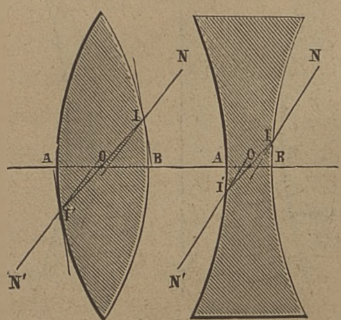


Fig. 304. Optyczny środek soczewki.

Linia prosta, przechodząca przez punkt O, lecz nachylona do osi głównej, łączy takie dwa elementy powierzchni soczewki (np. I i I'), które, jak łatwo można dowieść, są równoległe do siebie. Jeżeli tedy promień padający NI biegnie po załamaniu w kierunku $I\,I'$, to promień wychodzący $I'\,N'$ jest równoległy do $N\,I$. Gdy grubość soczewki jest nieznaczna i gdy promień padający tworzy niewielki kąt z osią główną, wówczas możemy przyjąć, że promień wychodzący $I'\,N'$ jest przedłużeniem padającego $N\,I$. Żaden więc promień, przechodzący przez punkt O soczewki, nie ulega załamaniu. Punkt ten zowie się *środkiem optycznym* so-

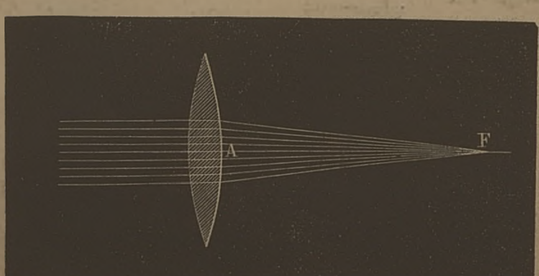


Fig. 305. Ognisko główne soczewki dwuwypukłej.

czewki, linia prosta, przechodząca przez ten punkt i pochyła do osi głównej, stanowi *boczną oś*. Ustawmy soczewkę dwuwypukłą *A* na drodze promieni słonecznych w taki sposób, ażeby biegły one równolegle do jej osi głównej, a zobaczymy na ekranie, umieszczonym po za soczewką, jasną okrągłą plamę, której wielkość i wyrazistość będą zależały od odległości ekranu od soczewki. Odsuwając lub przysuwając ten ostatni do soczewki, znajdziemy wreszcie takie jego położenie, w którem rysująca się na nim świetlna plama będzie posiadała najmniejsze wymiary, prawie zredukowane do punktu i najsilniejszy blask. Świetlny ten punkt powstaje przez to, że padające na soczewkę promienie, równoległe do osi głównej, tak zostają przez nią załamane, że zbierają się wszystkie w jednym punkcie *F* (fig. 305), leżącym na tejże osi, lecz po stronie przeciwnej, niż ciało wysyłające promienie. Punkt *F* zowie się *głównem ogniskiem*, a odległość jego od soczewki (odległość ogniskowa) zależy od substancyi, z której ta jest zrobiona oraz od krzywizny jej powierzchni.

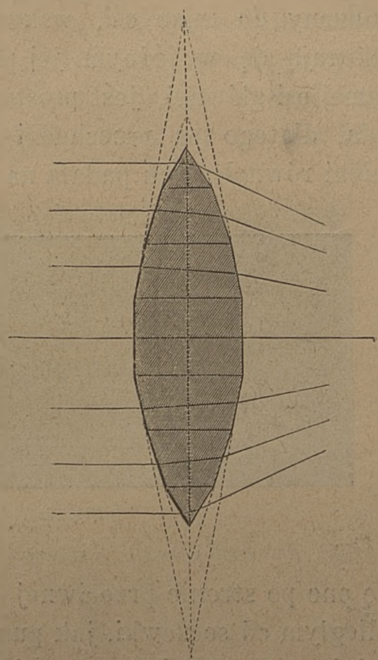


Fig. 306. Soczewka jako system pryzmatów.

Śledząc bieg pojedyńczych promieni, przy przejściu ich przez soczewkę, widzimy, że każdy z nich załamuje się tak, jak w pryzmacie, którego krawędź załamująca czyli wierzchołek jest odwrócony od osi głównej, z tą wszakże różnicą, że każdemu oddzielnemu promieniowi odpowiada inny kąt załamujący. Jako taki należy uważać mały kąt, utworzony przez kierunki dwóch elementów soczewki: jeden, przez który dany promień wchodzi do tej ostatniej, drugi zaś, przez który z niej wychodzi. Kąt po-

między dwoma takiemi elementami jest tem większy, im bardziej oddalamy się od głównej osi, jak to wyraźnie widać na fig. 306 (str. 469). Soczewka działa więc zupełnie tak samo, jak gdyby każdy promień padał na pryzmat o ostrej krawędzi i kącie załamującym tym większym, im dalej od osi głównej leży punkt padania. Rozumiemy tedy, dlaczego z wiązki promieni równoległych do osi głównej, ten który biegnie dalej od niej, zostaje silniej załamany w kierunku podstawy pryzmatu, czyli bardziej zbliżony do tejże osi, wskutek czego wszystkie te promienie zbiegają się w jednym jej punkcie. Promień biegnący wzdłuż samej osi głównej, jest prostopadły w punktach padania i wyjścia, dlatego też przechodzi niezałamany. Gdyby wiązka promieni równoległych padała na soczewkę od strony *F*, zebrałyby

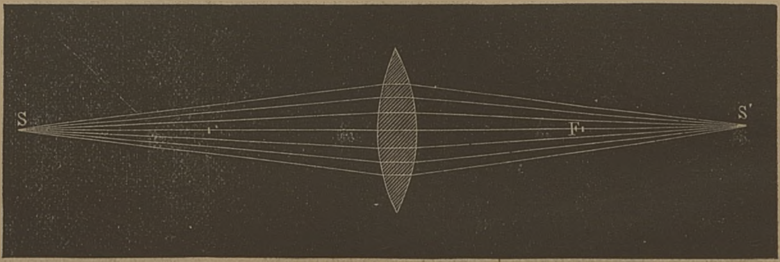


Fig. 307. Punkty sprzężone.

się one po stronie przeciwnej w jednym punkcie osi, tak samo odległym od soczewki, jak punkt *F*, albowiem promienie napotykałyby ten sam kąt załamujący i uległyby wskutek tego temu samemu odchyleniu. Każda soczewka posiada tedy dwa główne ogniska, leżące z jednej i z drugiej strony.

Jeżeli punkt świetlny znajduje się w głównem ognisku soczewki, wtedy z drugiej jej strony wychodzi wiązka promieni równoległych do osi głównej, które możemy tedy uważać jako zbierające się w nieskończenie oddalonym jej punkcie. Odsuńmy źródło światła od soczewki np. do punktu *S* (fig. 307), a zobaczymy po drugiej jej stronie wychodzącą wiązkę promieni, które zbierają się na osi w punkcie *S'*, przedstawiającym *rzeczywisty* obraz punktu *S*. Jeżeli ten ostatni znajduje się od soczewki na

podwójnej odległości ogniskowej, to i obraz *S'* tworzy się po drugiej stronie soczewki na takiejże odległości; naodwrót, gdy źródło światła jest w *S'*, obraz jego powstaje w *S*. Punkty np. *S* i *S'* będące w takim z sobą związku, że w jednym z nich powstaje obraz źródła światła, umieszczonego w drugim, zowią się *sprzężonemi*. Gdy punkt świecący leży dalej, niż podwójna odległość ogniskowa, obraz jego tworzy się po przeciwnej stronie na odległości, mniejszej niż podwójna, lecz większej niż pojedyńcza odległość ogniskowa. Wreszcie gdy punkt świetlny *S* leży pomiędzy ogniskiem głównem *F* a soczewką (fig. 308), wtedy nie może już ona mocno rozbieżnych promieni zebrać, ani nawet uczynić równoległemi, lecz zmniejsza tylko ich rozbieżność; w tym wypadku tylko przedłużenia załamanych promieni, nie zaś one same, przecinają się na osi głównej przed soczewką w punkcie *S'*, bardziej odległym od tej ostatniej, niż punkt *S*. Promienie więc, wysyłane przez *S*, po wyjściu z soczewki rozbiegają się tak, jak gdyby pochodziły z *S'*; w tym ostatnim powstaje przeto *urojony* obraz punktu *S*.

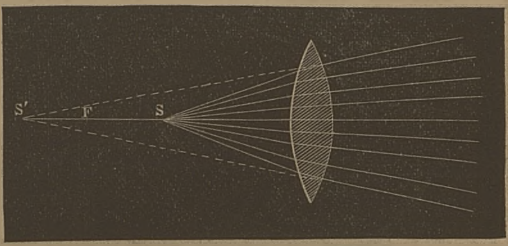


Fig. 308. Obraz urojony punktu świecącego.

Czytelnik zauważył już zapewne analogię między działaniem soczewki wypukłej i zwierciadła wklęsłego; otóż dalsze szczegóły, jak zobaczymy, jeszcze bardziej potwierdzą tę analogię. Rozważmy tworzenie się obrazów w wypadku, gdy, zamiast punktu świecącego, przed soczewką wypukłą stoi jakiś przedmiot większych rozmiarów *A B* (fig. 309, str. 472), którego odległość od soczewki niechaj będzie większa, niż podwójna odległość ogniskowa. Promień, przechodzący przez środek optyczny *O* soczewki, nie ulega załamaniu; promień zaś równoległy do osi głównej, jak już wiemy, po załamaniu przechodzi przez ognisko główne *F;* dwa te promienie przecinają się w punk-

cie *a*, który jest rzeczywistym obrazem *A*. To samo stosuje się do promieni wychodzących z punktu *B* tak, że *a b* przedstawia rzeczywisty, odwrócony i zmniejszony obraz przedmiotu *A B*. Przy zbliżaniu tego ostatniego do soczewki, promienie równoległe do osi głównej zachowują swój kierunek, te zaś, które przechodzą przez środek optyczny, padają bardziej ukośnie i przeci-

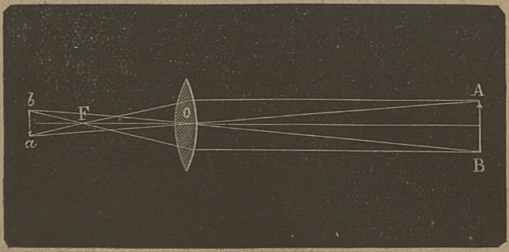


Fig. 309. Szematyczne przedstawienie sposobu tworzenia się obrazu rzeczywistego, odwróconego i zmniejszonego.

nają tamte na większej odległości od soczewki, niż w poprzednim wypadku tak, że obraz oddala się od niej i rozmiary jego się zwiększają. Gdy w pewnem położeniu obraz posiada wielkość

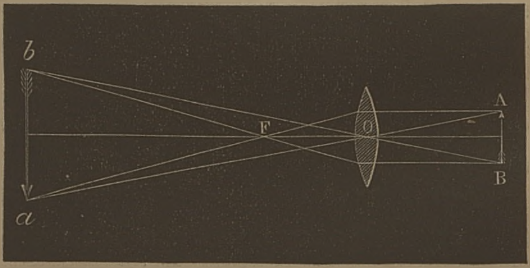


Fig. 310. Szematyczne przedstawienie sposobu tworzenia się obrazu rzeczywistego, odwróconego i powiększonego.

przedmiotu, wtedy mierząc odległości obydwóch od soczewki, przekonywamy się, iż są one równe. Przedmiotowi, umieszczonemu na odległości, nieco tylko większej, niż ogniskowa, odpowiada obraz rzeczywisty i odwrócony, lecz powiększony (fig.310), gdy zaś przedmiot znajduje się w samem ognisku głównem, promienie po wyjściu z soczewki biegną równolegle do osi głównej

i obraz wcale się nie tworzy. Wreszcie jeżeli przedmiot *A B* stoi pomiędzy ogniskiem głównem a soczewką (figura 311), wtedy promienie wychodzące z *A* i *B*, po przejściu przez soczewkę nie przecinają się wcale, są bowiem rozbieżne, przedłużenia ich tylko w tę samą stronę, po której znajduje się przedmiot, spotykają się w odpowiednich punktach *a* i *b*, wskutek czego oko, umieszczone przed soczewką, zobaczy po za nią, w *a b* urojony, prosty i powiększony obraz przedmiotu *A B*. Soczewka, używana w sposób ostatnio opisany, stanowi *lupę* czyli *szkło powiększające*. Przy jeszcze większem zbliżeniu przedmiotu do soczewki, promienie, przechodzące przez środek tej ostatniej, padają bardziej ukośnie, wskutek czego urojony obraz jest bliższym so-

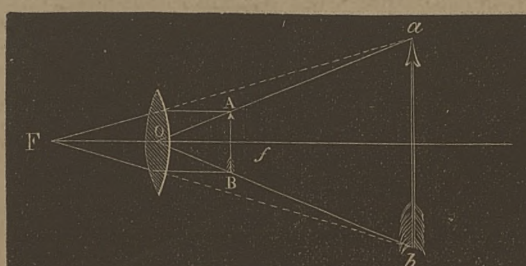


Fig. 311. Szematycznie przedstawiony obraz urojony, prosty i powiększony.

czewki, rozmiary zaś jego są mniejsze, niż w poprzednim wypadku. Rezultaty, które przedstawiliśmy tutaj graficznie, można stwierdzić za pomocą doświadczenia, jeżeli zapaloną świecę będziemy kolejno umieszczali w rozmaitem położeniu względem soczewki dwuwypukłej, przyczem odnośny obraz (naturalnie w wypadku, gdy jest rzeczywisty) może być otrzymywany na ekranie. Np. fig. 312 (str. 474) przedstawia świecę, ustawioną przed soczewką dwuwypukłą na odległości nieco większej, niż ogniskowa; tworzący się po drugiej stronie obraz jest rzeczywisty, odwrócony i powiększony.

Soczewki rozpraszające nie posiadają wcale rzeczywistych ognisk i dlatego też nie dają nigdy rzeczywistych obrazów, lecz tylko urojone. Jeżeli na soczewkę taką pada wiązka promieni równoległych (fig. 313, str. 474), wtedy wychodzą one z niej rozbieżnie, albowiem każdy z nich, po załamaniu, zbliża się do najgrub-

szej części soczewki (czyli do podstawy odpowiadającego tej części pryzmatu), a więc oddala się od osi głównej. Przedłużenia tych załamanych promieni w tę samą stronę, po której znajduje się ciało świecące, przecinają się na osi głównej w punkcie F (na fig. 313), który zowie się *urojonem ogniskiem głównem* dwu-



312. Rzeczywisty obraz świecy, otrzymany za pomocą dwuwypukłej soczewki.

wklęsłej soczewki. Każda taka soczewka posiada dwa urojone ogniska główne, leżące po obu jej stronach i jednakowo od niej oddalone; mają one dla niej takie samo znaczenie, jak rzeczywiste

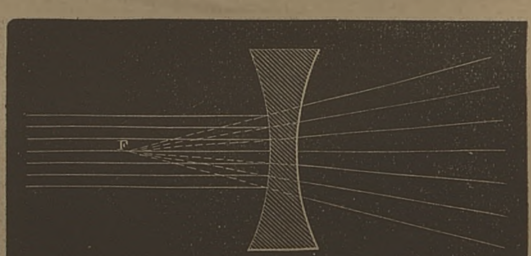


Fig. 313. Ognisko urojone dwuwklęsłej soczewki.

ogniska główne dla soczewki wypukłej. Z fig. 314 (str. 475) można powziąć wyobrażenie o położeniu i kształcie obrazu przedmiotów, umieszczonych przed soczewką dwuwklęsłą. Promień $A\ O$, jako przechodzący przez środek soczewki, nie zostaje załamany, promień zaś z tegoż punktu A, równoległy do osi głównej, ma po za-

łamaniu taki kierunek, że przedłużenie jego przechodzi przez ognisko urojone *F*. Dwa te promienie po wyjściu z soczewki rozbiegają się tak, jak gdyby wychodziły z punktu *a*, który też jest urojonym obrazem *A*. To samo stosuje się do promieni, wychodzących z *B*, którego obraz tworzy się w *b*. W ten sposób tłómaczy się powstanie obrazu *a b*, który jest urojony, prosty i zmniejszony, leży po tej samej stronie co i przedmiot, przytem bliżej soczewki, niż ten ostatni.

Z wielu form soczewek rozpatrzyliśmy bliżej tylko dwuwypukłą i dwuwklęsłą, gdyż pozostałe, co do swego działania, są zupełnie podobne do tych dwóch głównych przedstawicielek odpowiednich grup.

Obecnie po zbadaniu zasadniczych własności soczewek kulistych, musimy jeszcze zauważyć, że tylko działania soczewek

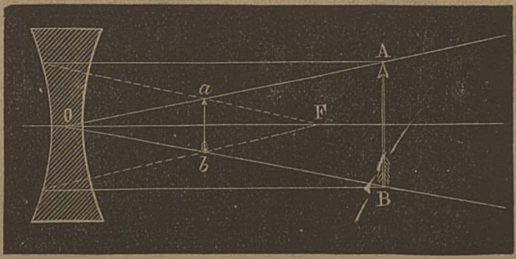


Fig. 314. Szematycznie przedstawiony sposób tworzenia się obrazu urojonego, prostego i zmniejszonego.

nieznacznych rozmiarów ściśle odpowiadają wyżej wyłuszczonym prawom. W razie bowiem gdy rozmiary soczewki są dość znaczne, w stosunku do promienia krzywizny jej powierzchni, t. j. do promienia kuli, której powierzchnia ta stanowi odcinek, wtedy nie wszystkie promienie świetlne, równoległe do osi głównej, przecinają się po załamaniu w jednym i tym samym punkcie, t. j. w ognisku głównem. Czynią to tylko te, które biegną nader blizko osi głównej, przecinając ją w rzeczonym punkcie; promienie zaś biegnące od niej dalej, dla których kąt padania jest większy, spotykają oś po załamaniu bliżej soczewki i to tem bliżej, im bardziej są oddalone od osi. Same także promienie wychodzące przecinają się wzajemnie, wskutek czego w każdej

płaszczyznie, przechodzącej przez oś soczewki, otrzymujemy jasną linię krzywą (fig. 315), składającą się z dwóch ramion, symetrycznych względem osi. W przestrzeni te punkty przecięcia załamanych promieni tworzą powierzchnię krzywą, zwaną *kaustyką przez załamanie.* Podobne zjawisko ma także miejsce i wtedy, gdy promienie, padające na soczewkę, są rozbieżne; jest ono znane pod nazwą *aberracyi kulistej (sferycznej).* Wskutek aberracyi, obrazy otrzymane za pomocą soczewki, nie są zupełnie wyraźne, albowiem obrazem punktu nie jest punkt, lecz mały krążek, zachodzący brzegami na obrazy punktów sąsiednich. Wpływ aberracyi sferycznej maleje wraz ze zmniejszeniem rozmiarów soczewki i dlatego brzeg jej zasłania się zwykle, szczególniej w przyrządach optycznych, nieprzezroczystą zasłoną, zwaną *diafragmą,* która nie przepuszcza wcale promieni, zbyt daleko biegnących od głównej osi. Nadmienimy także, że można zupełnie usunąć aberracyę przez stosowną kombinacyę dwóch szkieł, które razem tworzą złożoną soczewkę, zwaną *aplanatyczną.*

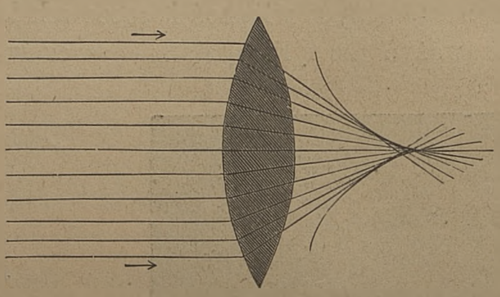


Fig. 315. Aberracya kulista. Kaustyka przez załamanie.

Soczewki dwuwypukłe, podobnie jak zwierciadła wklęsłe, mogą być użyte do spotęgowania w żądanym kierunku oświetlenia, wytwarzanego przez daną lampę, gdyż tak pierwsze, jak i drugie zbierają promienie i nie pozwalają im rozbiegać się na coraz szerszej przestrzeni. Ponieważ zaś zwierciadła wklęsłe, zastosowane do pewnych celów, jak np. do latarni morskiej, przedstawiają wiele niewygód (patrz str. 449), zastąpiono je więc przez soczewki dwuwypukłe, szczególniej w latarniach morskich pierwszorzędnych. Urządzenie takich latarni dioptrycznych datuje właściwie dopiero od czasu, gdy znakomity fizyk

Fresnel wynalazł w roku 1822 soczewkę tak zbudowaną, że pochłania tylko nieznaczną ilość światła, przez nią przechodzącego, podczas gdy w innych zbierających soczewkach większych rozmiarów, pochłanianie to, szczególniej przez środkową, a więc najgrubszą ich część, jest bardzo wielkie. Oprócz tego, soczewka Fresnel'a pozwala usunąć drugi jeszcze błąd zwyczajnych soczewek, a mianowicie kulistą aberracyę. Dzięki innym jeszcze ulepszeniom, zastosowanym przez Fresnel'a wspólnie z Arago, do samych lamp latarni morskich, światło ich otrzymało ten stopień intensywności i równomierności, który jest tak pożądany przy podobnem urządzeniu. Wreszcie w nowszych czasach zaczęto używać, zamiast lamp, światła elektrycznego, przez co blask latarni, nawet na znaczną odległość, został jeszcze bardziej spotęgowany, przyczem sam aparat soczewkowaty nie uległ zmianie. Cały aparat świecący umieszcza się na wysokiej wieży; niektóre z takich wież, jak np. na wyspie Cordouan, leżącej przy ujściu Żyrondy, zbudowane są całe z kamienia i mają prawdziwie pomnikowy wygląd.

ROZDZIAŁ V.

Przyrządy optyczne.

§ 1. Ciemnia optyczna. Mikroskop słoneczny.

Soczewki znalazły bardzo szerokie zastosowanie przy budowie najrozmaitszych przyrządów optycznych. Obecnie zajmiemy się opisem tych ostatnich, przyczem będziemy zwracali uwagę na ważniejsze z nich, pomijając mniej ważne.

Wspomnieliśmy już wyżej, że można otrzymać na ekranie odwrócony obraz krajobrazu, oświeconego przez słońce, jeżeli ekran ten umieszczony jest w ciemnym pokoju, naprzeciwko otworu jego okiennicy. Obraz ten wszakże, jak wiemy, posiada przy małym otworze nader słabe świetlne natężenie, przy dużym zaś jest niewyraźny. W celu usunięcia tej niedogodności, pe-

wien fizyk imieniem Porta, żyjący w XVII stuleciu, pierwszy spróbował rzucić najprzód promienie świetlne, wpadające przez otwór, na kuliste zwierciadło wklęsłe, a następnie dopiero odbite promienie zebrać na ekranie; wkrótce potem zastąpił on zwierciadło przez soczewkę zbierającą, którą umieszczał w samym otworze okiennicy i w ten sposób doszedł do zadziwiających rezultatów. Od owego czasu datuje odkrycie tak zwanej *ciemni optycznej* (camera obscura), której obecnie nadaje się rozmaite kształty i nazwy, zależnie od celu, do jakiego ma służyć. Zawsze jednak przyrząd taki polega na własności soczewek wypukłych dawania rzeczywistego powiększonego obrazu przedmiotu, umieszczonego

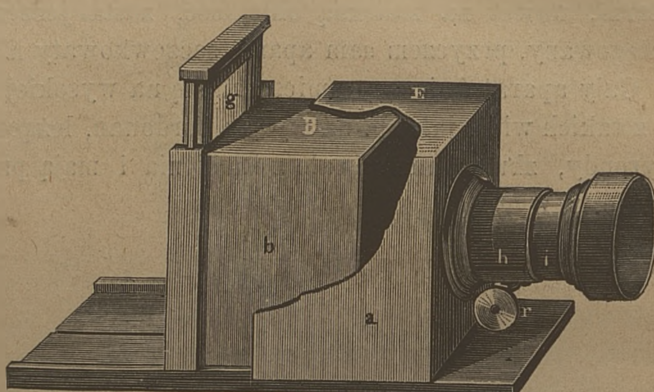


Fig. 316. Ciemnia optyczna.

przed nią na odległości większej, niż pojedyńcza i mniejszej, niż podwójna odległość ogniskowa. Gdy np. chodzi o otrzymanie powiększonej podobizny danego krajobrazu, wtedy naprzeciw tego ostatniego, w otworze, wiodącym do ciemnego pokoju, umieszcza się soczewkę zbierającą, przyczem na odpowiednio ustawionym ekranie tworzy się żądany obraz. Ponieważ części krajobrazu znajdują się na bardzo rozmaitej odległości od soczewki, przeto nie wszystkie rysują się na ekranie z jednakową wyrazistością. Brak ten wszakże nie jest zbyt wielki, wiemy bowiem, że gdy przedmiot odsuwa się od soczewki, począwszy od podwójnej odległości ogniskowej do nieskończoności, obraz jego

przesuwa się tylko od podwójnej do pojedyńczej odległości ogniskowej, czyli że wielkiej różnicy w oddaleniu przedmiotu odpowiada tylko nieznaczna różnica w położeniu obrazu. Przyciemnienie pokoju, mające na celu usunięcie wpływu bocznego światła, zacierającego kontury obrazu, może być zastąpione przez użycie pewnego rodzaju skrzynki, wewnątrz poczernionej, składającej się z dwóch części (fig. 316); soczewka wstawiona jest w metalową rurkę *i*, przesuwającą się przy obracaniu guzika *r* wzdłuż obejmującego ją rękawa *h*. W części *E a*, otwartej od tyłu, przesuwa się inna *D b*, z przodu otwarta; w tę ostatnią wstawia się matową tafelkę szklaną *g*, służącą jako ekran do przyjmowania obrazów. Im bliżej znajduje się przedmiot, któ-

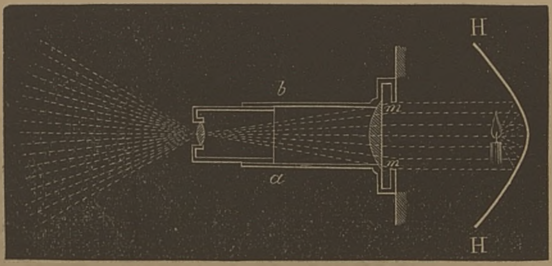


Fig. 317. Szemat latarni czarnoksięzkiej.

rego obraz ma być rzucony na tafelkę, tembardziej należy wysuwać część *D b* z *E a*; nieznaczne zaś zmiany w położeniu przedmiotu względem soczewki osiąga się za pomocą obracania guzika *r*. Przyrząd ten—jedyny, który z pomiędzy wszystkich instrumentów, opartych na tej samej zasadzie, zachował nazwę ciemni optycznej—stanowił przez długi czas tylko zabawkę, lecz gdy udało się utrwalić obrazy, powstające na tylnej jego ścianie, t. j. gdy pojawiła się sztuka fotograficzna, zajął on bardzo ważne miejsce w rzędzie instrumentów optycznych. O tem jego znaczeniu pomówimy obszernie w rozdziale o fotografii.

Podobne do powyższego urządzenie przedstawia *latarnia czarnoksięzka*, szematycznie przedstawiona na fig. 317. Jako przedmioty służą tutaj fotografie lub malowidła na szkle, umieszczone w *a b* i silnie oświecone przez promienie świecy lub lam-

py, ustawionej wewnątrz latarni pomiędzy zwierciadłem wklęsłem *H H* i soczewką zbierającą *m m*. Na przodzie, w części wysuwalnej, znajduje się soczewka wypukła, która rzuca powiększony obraz przedmiotu na ekran. Latarnia czarnoksiężka może niekiedy służyć nietylko do ulubionych przedstawień z fantasmagoryami, obrazami niknącemi i t. p., lecz także podczas odczytów naukowych, do ukazywania, w znacznem powiększeniu, pouczających rysunków, które w ten sposób stają się widocznemi dla wszystkich uczestników. Na tej samej także zasadzie polega *mikroskop słoneczny* (fig. 318), służący wyłącznie do celów naukowych. W rurce *L* znajduje się soczewka wypukła o krótkiej odległości ogniskowej; w *m*, nieco przed ogniskiem głównem tej-

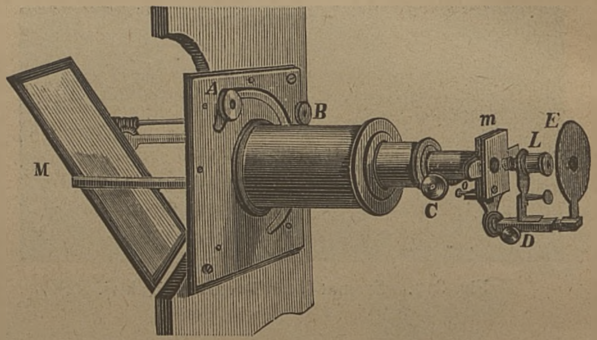


Fig. 318. Mikroskop słoneczny.

że soczewki, umieszcza się pomiędzy dwiema szklanemi tafelkami dany mały przedmiot, którego olbrzymi obraz odtwarza się na ekranie. Ponieważ światło, wysyłane przez ten przedmiot, rozchodzi się na względnie bardzo wielką płaszczyznę, zajętą przez obraz, to ażeby ten ostatni był dosyć jasny, należy nader silnie oświecić przedmiot. Do tego celu służy inna wielka soczewka, umieszczona na końcu szerszej rurki przyrządu i zbierająca w swem ognisku głównem promienie, które mają oświecić przedmiot. Za pomocą guzika *C* można ten ostatni sprowadzić do wspomnianego ogniska, guzik zaś *D* służy do przesuwania soczewki w *L*, gdy chodzi o rzucenie obrazu dokładnie na dany ekran. Przyrząd opisany wstawia się, jak pokazuje fig. 318,

Roznosiciele mają Prospekty i Zeszyty na okaz!

Дозволено Цензурою, Варшава 21 Апрѣля 1889 г.

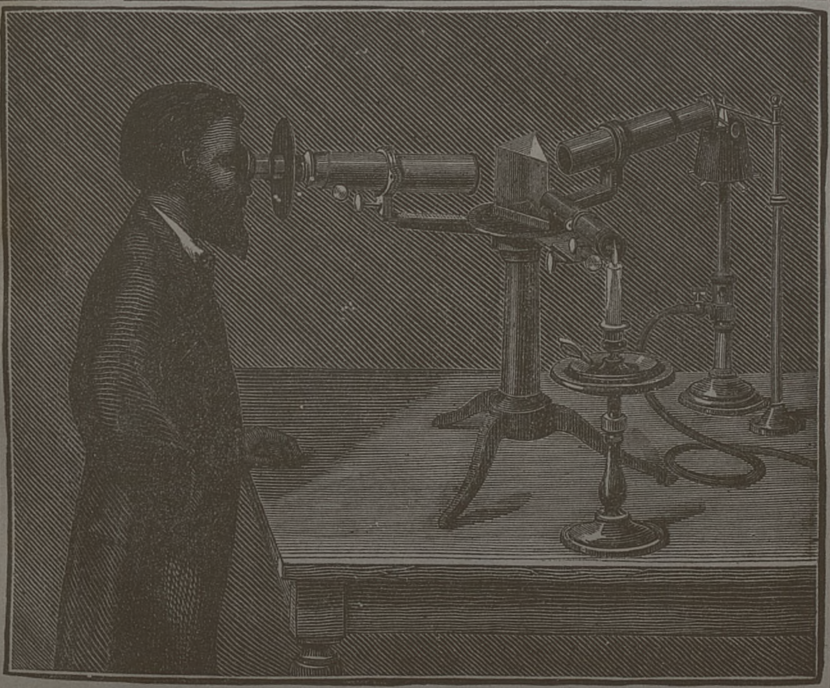
Druk Jana Cotty w Warszawie, Senatorska 29.

Cena 20 kop. **Zeszyt 16.** Cena 20 kop.

SIŁY PRZYRODY.

POPULARNY WYKŁAD FIZYKI

I GŁÓWNIEJSZYCH JEJ ZASTOSOWAŃ.



Spektroskop

Podług dzieła A. Guillemin'a „Le monde physique"

OPRACOWALI

Józefowa Nusbaum

bak. n. prz.

i

Henryk Silberstein

dr. fil., b. as. chem. przy un. w Bernie.

WARSZAWA.

Nakładem Księgarni **H. Olawskiego**, ul. Mazowiecka № 6.

1889.

w otwór rury *B* tak zwanego *heliostatu*, którego zwierciadło *M* może, za pośrednictwem guzików *A* i *B* tak być obracane, że padające nań promienie słoneczne odbijają się w kierunku rury *B*, poczem zostają zebrane i oświecają przedmiot, umieszczony w *m*. Do oświecenia może, rozumie się, także służyć lampa elektryczna lub światło Drumond'a, lecz wtedy nazwa mikroskopu słonecznego nie jest już zupełnie właściwa. Mikroskopy takie są bardzo pożyteczne, zwłaszcza przy wykładach nauk przyrodniczych, pozwalają bowiem przedstawić na ekranie, w olbrzymiem powiększeniu, mikroskopijnie małe preparaty. W czasie oblężenia Paryża używano tych przyrządów, oświeconych elektrycznością, do rzucania na ścianę obrazu maleńkich fotografowanych telegramów, przynoszonych przez gołębie pocztowe.

§ 2. Mikroskop prosty i złożony.

W poprzednim paragrafie opisaliśmy przyrządy optyczne, dające powiększone rzeczywiste obrazy, które mogą być rzucone na ekran. Lecz oprócz nich, istnieje jeszcze inna grupa przyrządów, daleko obszerniejsza, dająca obrazy urojone, widoczne tylko dla jednego obserwatora. Najprostszą formą szkła powiększającego tego rodzaju jest lupa, t. j. soczewka płasko-wypukła lub dwuwypukła, ujęta w odpowiednią oprawę: daje ona, jak już wiemy, powiększony i urojony obraz przedmiotu, umieszczonego pomiędzy nią a jej ogniskiem głównem. Właściwy zaś *mikroskop prosty* (fig. 319) składa się z metalowej podstawy, do której u góry przymocowana jest lupa, pod nią widzimy rodzaj stolika, zwanego przedmiotowym, na który kładzie się przedmiot, mający być rozpatrywanym. Stolik jest pośrodku przedziurawiony, a nad otworem układa się szkiełko z danym preparatem; potrzebne światło przychodzi od dołu, wskutek odbicia od umieszczonego tamże rucho-

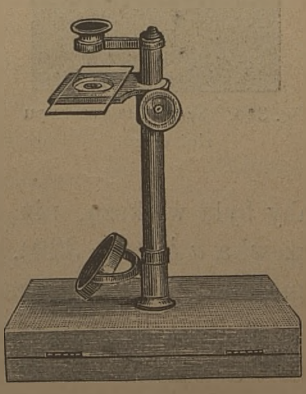


Fig. 319. Mikroskop prosty.

mego zwierciadełka wklęsłego, któremu przez stosowny obrót można nadać żądane położenie. Należyte ustawienie lupy względem badanego przedmiotu osiąga się przez obracanie bocznego guzika, połączonego z mechanizmem, ukrytym wewnątrz podstawy. Lupa i mikroskop prosty oddały naukom przyrodniczym wielkie usługi, szczególniej zaś ostatni, często używany przy preparowaniu i badaniu roślin. W taki sposób zastosowana lupa rzadko może powiększać więcej, jak 60 razy, albowiem przy jeszcze znaczniejszej zdolności powiększania, ognisko główne wypadałoby tak blizko soczewki, że pomiędzy nią a przedmiotem preparowanym nie byłoby już miejsca dla narzędzi, ułatwiających preparowanie.

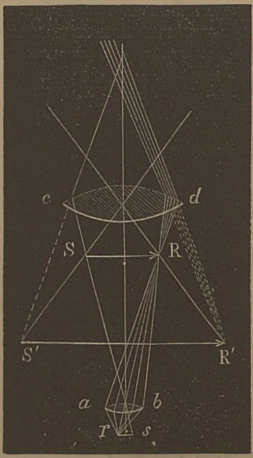


Fig. 320. Szemat mikroskopu złożonego.

Jeżeli niekiedy lupa lub mikroskop prosty składają się z kilku soczewek, to jednak wszystkie one działają w podobny sposób tak, że system przez nie utworzony, zastępuje tylko jedną silniej załamującą soczewkę. Przeciwnie, *mikroskop złożony* składa się z dwóch wypukłych soczewek lub też z dwóch systemów soczewek, z których każda działa w sposób zupełnie odmienny. Umieszcza się je na wspólnej osi, a odległość pomiędzy niemi dobiera się tak, aby była większą, niż suma ich odległości ogniskowych. Soczewka *a b* (fig. 320), o bardzo małej odległości ogniskowej, znajduje się bliżej przedmiotu i zowie się *objektywem*; przed nim, nieco dalej niż jego ognisko główne, widzimy mały przedmiot *r s*, którego odwrócony, powiększony i rzeczywisty obraz tworzy się po za objektywem w *S R*. Obraz ten odgrywa względem drugiej soczewki *c d*, bliższej oka obserwatora i zwanej *okularem*, rolę ciała wysyłającego światło; ponieważ wypada on pomiędzy okularem a jego ogniskiem głównem, to patrząc z góry przez okular, widzimy w *S' R'* powiększony, prosty i urojony obraz pierwszego obrazu *S R*. Przedmiot tedy *r s* ukazuje się nam

w podwójnem powiększeniu, spowodowanem najprzód przez objektyw, a następnie dopiero—przez okular. Fig. 321 przedstawia mikroskop złożony w całości. Okular *n* i objektyw *o* ujęte są we wspólną metalową rurę, przesuwającą się z lekkiem tarciem wzdłuż metalowego również rękawa *h*; nieznaczne zaś zmiany w jej położeniu osiąga się przez obracanie śrubki *k*. Przedmiot, zwykle przezroczysty, umieszcza się na szkiełku i kładzie to ostatnie na stoliku *p p*, mającym pośrodku otwór, przez który z dołu dochodzi potrzebne światło, odbite od ruchomego zwierciadła *s s'*. Gdy zaś przedmiot jest nieprzezroczysty, oświeca się go z góry za pomocą promieni, zebranych przez stosowną soczewkę. Rurę mikroskopową można wyciągnąć tak wysoko, że pierwszy obraz *S R* (patrz fig. 320) wypada przed ogniskiem głównem okularu, a wtedy ten ostatni daje z obrazu *S R* powtórny *rzeczywisty* i *powiększony* obraz, który można rzucić na ekran. Ażeby tak rzucony obraz uczynić dostatecznie jasnym, należy na przedmiot, leżący na stoliku mikroskopu, skierować światło słoneczne, elektryczne, lub światło Drumond'a. W tym celu zbiera się promienie jednego z tych źródeł, za pomocą soczewki *l* oraz zwierciadła *s'* (fig. 322, str. 484), na przedmiocie *r s*, z którego objektyw *o* daje rzeczywisty obraz *S R*. Powtórny rzeczywisty obraz *S' R'*, jaki daje okular *n*, pojawiłby się jednak przy pionowej rurze mikroskopowej, na suficie pokoju; otóż dla zwrócenia obrazu w kierunku bocznym, ku ekranowi, umieszcza się nad mikroskopem pryzmat *p* tak, aby wchodzące doń od dołu promienie uległy zupełnemu wewnętrznemu odbiciu. Widzimy tedy, że w pewnych warunkach, każdy mikroskop złożony może także służyć do objektywnego przedstawienia preparatów, a więc do rzucania rzeczywistych ich obrazów na ekran ([1]).

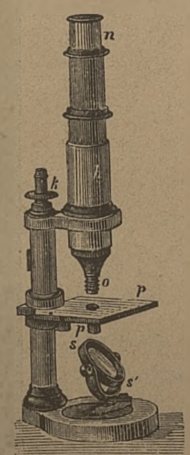


Fig. 321. Mikroskop złożony.

([1]) Lomel, l. c.

Powiększenie, jakie daje mikroskop złożony, równa się iloczynowi z powiększeń objektywu i okularu. Istnieje formuła matematyczna, pozwalająca z odległości ogniskowych tych dwóch soczewek, z odległości przedmiotu od objektywu i wreszcie z odległości dokładnego widzenia dla obserwatora (ten ostatni punkt objaśnimy bliżej w rozdziale o oku) obliczyć teoretycznie powiększenie, jakie można otrzymać za pomocą danego mikroskopu. Doświadczalnie zaś oblicza się to w sposób następujący: przed objektywem umieszcza się szklany mikrometr czyli tafelkę, na

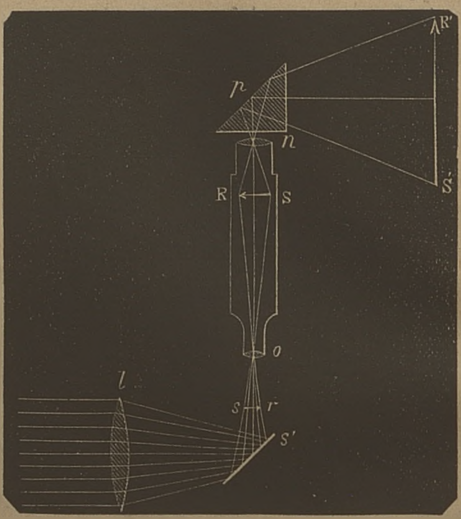


Fig. 322. Objektywne przedstawienie obrazu, powiększonego przez mikroskop złożony.

której znajdują się bardzo drobne podziałki, np. setne części milimetra; następnie przy pomocy pryzmatu o zupełnem wewnętrznem odbiciu otrzymuje się powiększony obraz tego mikrometru na ekranie. Przypuśćmy, że odrysowało się 10 podziałek, które zajmują na ekranie długość 25 milimetrów, jedna więc podziałka zajmuje tam 2,5 milim., a że na mikrometrze równa się ona 0,01 milim., wynika z tego, że dany mikroskop powiększa 250 razy. Oczywiście otrzymuje się przytem tylko powiększenie linijne, t. j. w kierunku średnicy; powiększenie zaś w płaszczyznie równa się linijnemu, podniesionemu do kwadratu. Gdy np.

pierwsze wynosi 50, 100 lub 500, wtedy drugie równa się 2500, 10000 i 250000.

W celu usunięcia wpływu aberracyi kulistej, pochodzącej od promieni bardzo ukośnie padających na okular, pomieszcza się w rurze mikroskopowej, nieco dalej tego miejsca, gdzie powstaje pierwszy obraz $S\ R$ (patrz fig. 320, str. 482) *diafragmę*, t. j. nieprzezroczystą zasłonę z okrągłym otworem pośrodku; diafragma, jak wiemy, zatrzymuje bardziej skrajne promienie. Oko, patrząc przez okular, widzi jednocześnie obraz przedmiotu i wyraźne brzegi otworu diafragmy; poprowadziwszy od nich proste linie do optycznego środka objektywu i przedłużywszy je po drugiej jego stronie, otrzymuje się powierzchnię stożkowatą, ograniczającą przestrzeń, która może być widziana przez okular. Przestrzeń tę nazywamy *polem widzenia* mikroskopu.

W większości mikroskopów rura jest pionowa, lecz istnieją także przyrządy, w których można ją nachylać, albo nawet nadać położenie poziome, co nadzwyczaj jest wygodne dla obserwatora, uwalnia go bowiem od ciągłego opuszczania głowy. W celu umożliwienia kilku badaczom jednoczesnego rozpatrywania danego przedmiotu, Nachet zbudował mikroskop o jednym wspólnym objektywie, lecz o trzech okularach, z których każdy znajduje się w oddzielnej rurze; światło, przechodzące przez objektyw, zostaje skierowane ku trzem okularom za pomocą stosownych pryzmatów. Tenże optyk zbudował dalej podwójne mikroskopy, przez które można patrzeć jednocześnie obu oczyma, przyczem dla każdego oka przedmiot przedstawia się nieco inaczej, co pozwala, jak zobaczymy następnie, widzieć go przez mikroskop, jakby nie na płaszczyznie, lecz jako ciało w przestrzeni.

§ 3. Lunety. Teleskopy.

Jeżeli mikroskop otwiera dla nas tajemnice nieskończenie małego świata, jeżeli pozwala nam widzieć przedmioty, wprawdzie blizkie, lecz z powodu swej małości nie mogące bezpośrednio być obserwowane, to z drugiej strony lunety i teleskopy

odgrywają rolę analogiczną względem ciał, które znów z powodu swej znacznej od nas odległości nie mogą być gołem okiem dostrzeżone, niezależnie od tego, jaka jest istotna ich wielkość. Przy pomocy lunety możemy przeniknąć okiem do głębin wszechświata i odkryć tam gwiazdy, które bez tego przyrządu pozostałyby dla nas na zawsze niewidoczne; oprócz tego, ciała niebieskie, widzialne bezpośrednio, zostają przy użyciu lunety tak do nas przybliżone, że możemy niekiedy zdać sobie sprawę ze szczegółów ich budowy, przez co z kolei znakomicie powiększa się zakres naszych badań.

Przyrządy, służące do rzeczonego celu, polegały z początku jedynie na załamaniu światła w soczewkach; na pewien czas lunety te, czyli t. zw. *refraktory*, wyszły z użycia, lecz gdy następnie odkryto sposoby usunięcia wpływu aberracyi światła, powrócono znów do nich. Na rzeczonej zasadzie zbudowana jest *luneta astronomiczna*, zwana także lunetą Keplera. Składa się ona z objektywu *o* (fig. 323), t. j. soczewki dwuwypukłej o znacznej odległości ogniskowej i z umieszczonego po za objektywem, na wspólnej z nim osi, okularu *o'*—drugiej soczewki dwuwypukłej, o mniejszej odległości ogniskowej. Objektyw daje z jakiegobądź odległego przedmiotu mały rzeczywisty i odwrócony obraz, który następnie rozpatruje się przez okular, jak przez lupę, ostatni więc powinien być tak ustawiony, ażeby obraz wypadł pomiędzy nim a jego ogniskiem głównem. Jeżeli *a b* przedstawia ten obraz, to oko umieszczone po za okularem, widzi go w *A B*, jako obraz urojony, powiększony i prosty względem *a b*,

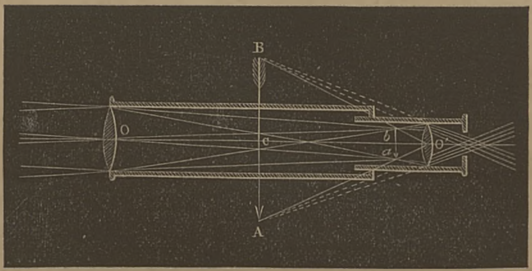


Fig. 323. Szemat lunety astronomicznej.

lecz odwrócony względem samego rozpatrywanego przedmiotu, co jednak przy poszukiwaniach astronomicznych nie ma wielkiego znaczenia. Kąt, jaki tworzą linie, poprowadzone od oka obserwatora do punktów obrazu A i B jest większy, aniżeli podobnyż kąt, pod jakim widziany jest przedmiot przez oko nieuzbrojone; na tem właśnie polega powiększające, a właściwie przybliżające działanie lunety, zobaczymy bowiem następnie, że przedmiot wydaje nam się tem bliższy, im większy jest kąt, utworzony przez linie, idące od oka do dwóch krańcowych jego punktów, czyli t. zw. kąt widzenia. Fig. 324 przedstawia ze-

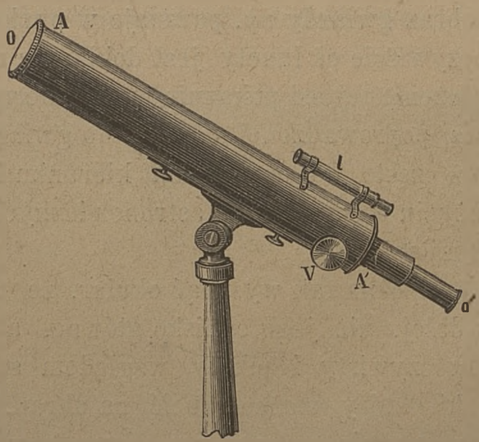


Fig. 324. Luneta astronomiczna czyli Keplera.

wnętrzny wygląd lunety Keplera. Objektyw umieszczony jest na przednim końcu A odpowiednio długiej rury; na przeciwnym końcu, w węższej rurce A', przesuwającej się w jednę lub drugą stronę, znajduje się okular. Żądane położenie objektywu, przy którem obraz wypada na odległości dokładnego widzenia, osiąga się przez obracanie guzika V, połączonego z mechanizmem, ukrytym w szerszej rurze lunety. Położenie to zależy od powiększenia, jakie daje luneta i od odległości rozpatrywanych przedmiotów, jeżeli ta jest względnie nieznaczna. Dla wszystkich zaś przedmiotów na niebie, których odległość, w stosunku do wymiarów lunety, można zawsze uważać za nieskończenie wielką, po-

łożenie szkła zależy tylko od stopnia użytego powiększenia oraz od oka obserwatora. Co do wpływu aberracyi kulistości, to i tutaj zostaje on po części usunięty przez kilka przepon (diafragm), umieszczonych w różnych miejscach lunety.

Przy badaniach astronomicznych należy koniecznie mieć wewnątrz lunety pewien stały punkt, do którego możnaby odnosić położenie rozpatrywanego ciała. W tym celu w węższej rurce *A'*, w miejscu, gdzie powinien wypaść obraz *a b* (patrz fig. 323), ażeby był dokładnie przez okular widziany, naciągnięte są dwie nadzwyczaj cienkie nitki pajęcze lub platynowe, wzajemnie prostopadłe do siebie i przecinające się dokładnie na osi lunety. Jeżeli obraz gwiazdy np. powstaje w punkcie przecięcia tych nitek, to oczywiście oś lunety jest dokładnie na nią skierowana tak, że położenie tej osi pokazuje wtedy kierunek tak zwanej *linii widzenia*, poprowadzonej od oka do gwiazdy. Luneta Keplera służy też często do oznaczenia kierunku linii widzenia nietylko przy użyciu przyrządów astronomicznych, lecz także fizycznych i inżynierskich.

W lunecie tej można tak wysunąć okular, że obraz *a b* wypada przed nim dalej, niż jego ognisko główne, a wtedy otrzymuje się obraz rzeczywisty i prosty względem samego przedmiotu, a więc taki, który można rzucić na ekran. W podobny sposób np. otrzymuje się na ekranie obraz tarczy słonecznej, znacznie powiększonej, na której widzowie mogą wtedy dokładnie rozróżnić niektóre szczegóły budowy słońca.

Do opisanego tutaj przyrządu dodaje się zwykle małą lunetkę *l* (fig. 324), której oś jest równoległa do osi dużej lunety i w ognisku której znajdują się również dwie wzajemnie prostopadłe nitki. Gdy luneta silnie powiększa, wtedy pole widzenia, jakie można objąć przez nią okiem, jest bardzo ograniczone tak, że chcąc odszukać jakiś przedmiot na niebie, dość trudno jest wprowadzić go w pole widzenia. To ostatnie zaś jest dość rozległe w nie tak silnie powiększającej lunetce *l*; za jej też pomocą daleko łatwiej znaleść dany przedmiot na niebie; gdy obraz jego wypada w punkcie przecięcia wspomnianych nitek, wtedy znajduje się on także w polu widzenia głównej lunety, równoległej

do lunetki *l*. Powiększenie lunety, przy tym samym objektywie, zależy od okularu i jest tem większe, im mniejsza jest odległość ogniskowa tego ostatniego. Właściwie jednak dobroć lunety i jej siła powiększająca zależą głównie od objektywu: wpływa tutaj czystość materyału, z którego zrobiona jest odnośna soczewka, następnie jej oszlifowanie i gładkość powierzchni. Przy jednakowych wymienionych warunkach, objektyw o największej średnicy oraz odległości ogniskowej powoduje najsilniejsze powiększenie. Dalej przy rozpatrywaniu gwiazd stałych, natężenie światła obrazu nie zmniejsza się wskutek powiększenia, teoretycznie bowiem jasność wzrasta wtedy w stosunku kwadratu ze średnicy objektywu oraz źrenicy naszego oka. Praktycznie zaś

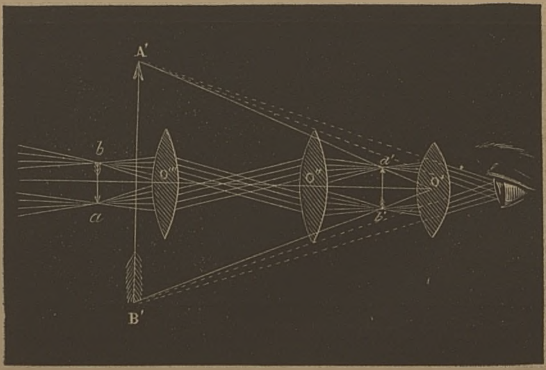


Fig. 325. Droga promieni w lunecie ziemskiej.

jasność ta jest mniejsza, niż wypada z takiego obliczenia, a to z powodu dość znacznego pochłonięcia, jakiemu ulegają promienie świetlne przy przejściu przez atmosferę ziemską. W każdym razie to wzmożenie jasności po części tłómaczy nam, dlaczego za pomocą lunety można w biały dzień znaleść na niebie gwiazdy, które dla gołego oka są widzialne tylko w nocy.

W lunecie Keplera przedmioty są widziane w odwróceniu, co, jak powiedzieliśmy, nie ma znaczenia przy badaniach astronomicznych, lecz co przedstawia wiele niewygód podczas rozpatrywania odległych przedmiotów na ziemi. Dlatego też w *lunecie ziemskiej* postarano się usunąć tę wadę; tutaj odwraca się

obraz za pomocą dwóch jednakowych i równoległych do siebie soczewek O''' i O'' (fig. 325, str. 489), które umieszcza się pomiędzy objektywem i okularem; *a b* przedstawia *odwrócony* obraz dany przez objektyw. Promienie, wychodzące z punktu *b*, znajdującego się w ognisku bocznej osi soczewki O''', po przejściu przez tę soczewkę stają się równoległe do bocznej jej osi, następnie zaś przechodzą przez O'' i skupiają się w b'; to samo stosuje się do promieni z punktu *a* tak, że w $a'\ b'$ powstaje obraz równy co do wielkości obrazowi *a b*, lecz *prosty*. Ten właśnie prosty obraz rozpatruje się przez okular O' jak przez lupę; przedstawia się on oku powiększony i prosty ($A'\ B'$). Zamiast jednej środkowej soczewki, zwykle używa się obecnie dwóch soczewek płasko-wypukłych, przez co liczba ich, składająca okular, urosła do czterech; są one ujęte razem w jedną wspólną

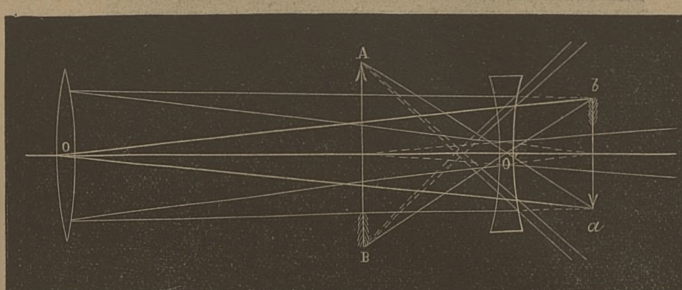


Fig. 326. Droga promieni w lunecie Galileusza.

rurę. Należy dodać wszakże, że w podobnie urządzonej lunecie ziemskiej, jasność obrazu znacznie się zmniejsza tak, że przy tym samym objektywie nie można wybrać równie silnego powiększenia, jak przy użyciu lunety do celów astronomicznych. Powód osłabienia jasności leży w tem, że promienie świetlne muszą przechodzić przez dodatkowe dwie soczewki, w których ulegają częściowemu pochłonięciu.

W *lunecie Galileusza*, zwanej także lunetą holenderską, obrazy przedmiotów są również proste. Tutaj rzeczywisty obraz *a b* (fig. 326), jaki dałby objektyw *O*, wcale się nie tworzy, albowiem promienie, zbiegające się ku miejscu tegoż obrazu, napotykają po drodze swej dwuwklęsły okular O', który załamuje je

w taki sposób, że zdają się wychodzić z prostego urojonego obrazu *A B*. Ażeby obraz ten wypadł na odległości dokładnego widzenia, należy nadać obydwom soczewkom odpowiednie wzajemne położenie, przedstawia się zaś on pod większym kątem widzenia, niż przedmiot, widziany gołem okiem, gdy odległość urojonego ogniska okularu od niego jest mniejsza od odległości ogniskowej objektywu.

Ponieważ rzeczywisty obraz od objektywu wcale w lunecie tej się nie tworzy, to niema w niej także owych krzyżujących się nitek, wskutek czego nie może ona służyć do oznaczania kierunku linii widzenia; oprócz tego, nie daje także silnego powiększenia, obecnie też w astronomii zupełnie nie bywa używaną. Natomiast, dzięki swej nieznacznej długości, nadaje się ona bardzo dobrze do obserwacyi niezbyt oddalonych przedmiotów, bywa

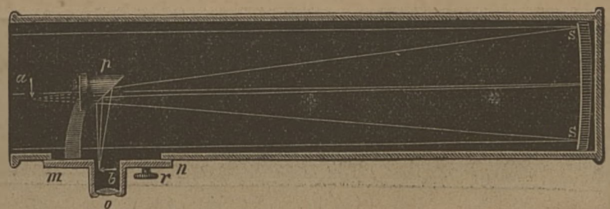


Fig. 327. Działanie teleskopu Newtona,

też często używana przez strategików i myśliwych, jako t. zw. luneta polowa, dająca 20—30-krotne powiększenie. Również i lornetka teatralna przedstawia lunetę Galileusza, powiększającą 2—3 razy. Ponieważ większość osób nie jest przyzwyczajona patrzeć tylko jednem okiem i trzymać drugie zamknięte, to w lornetce takiej zwykle są połączone dwie lunety. Za pomocą odpowiedniego śrubowego mechanizmu można okulary oddalać lub zbliżać do objektywów tak, że szkła te mogą służyć dla każdego oka.

Teleskopy czyli *reflektory* różnią się od dotychczas opisanych lunet, należących do refraktorów pod tym względem, że w pierwszych objektywu nie stanowi soczewka, lecz zwierciadło wklęsłe, dające rzeczywisty odwrócony obraz badanego przedmiotu, który to obraz rozpatruje się przez okular. W *teleskopie*

Newtona (fig. 327, str. 491) zwierciadło wklęsłe *S S* umieszczone jest w głębi odpowiednio szerokiej rury, z przodu otwartej. Promienie świetlne, wysyłane przez jakikolwiek odległy przedmiot, po odbiciu od zwierciadła zebrałyby się i dałyby w *a* rzeczywisty i odwrócony obraz, lecz przed zebraniem się tamże, zostają zwrócone w kierunku bocznej ściany rury, a to przez powtórne odbicie od płaskiego zwierciadła *p*. To ostatnie jest nachylone do osi rury pod kątem 45° tak, że ów obraz tworzy się w *b;* rozpatruje go się przez okular *o*, jak przez lupę. Zwrócenie promieni ku bocznemu otworowi rury jest konieczne dlatego, że gdyby obraz był rozpatrywany z przodu rury, wtedy głowa obserwatora zatrzymywałaby znaczną ilość światła, padającego od przedmiotu na zwierciadło. Z drugiej wszakże strony, wskutek tego podwójnego odbicia od dwóch zwierciadeł, natężenie świa-



Fig. 328. Działanie teleskopu Herschel'a.

tła znacznie się zmniejsza, z tego też powodu sławny astronom William Herschel tak urządził swój teleskop, że powtórne odbicie zupełnie zostało w nim usunięte. Mianowicie w olbrzymich teleskopach Herschel'a, a także lorda Rosse, zwierciadło wklęsłe jest nieco pochylone względem osi rury teleskopowej tak, że rzeczywisty obraz *a* tworzy się nad samym brzegiem rury (fig. 328), gdzie też jest rozpatrywany przez okular dwuwypukły *o*. Wprawdzie i tutaj głowa obserwatora zasłania sobą część otworu rury tak, że pewien odcinek zwierciadła wcale nie otrzymuje promieni od rozpatrywanego świecącego ciała, lecz odcinek ten jest nieznaczny w obec wielkiej średnicy samego zwierciadła, dochodzącej do 1—2 metrów. Wreszcie w *teleskopie Gregory'ego* (fig. 329) zwierciadło wklęsłe *S S* posiada pośrodku okrągły otwór, po za którym, w zwężonej części rury znajduje się oku-

lar *o*. Zwierciadło *S S* daje rzeczywisty i odwrócony obraz *a* odległego przedmiotu, przyczem obraz ten powstaje nieco przed ogniskiem głównem drugiego zwierciadła wklęsłego *V*. To ostatnie daje powtórny obraz *b*—także rzeczywisty i odwrócony względem *a*, lecz prosty względem badanego przedmiotu—który rozpatruje się przez okular *o*. Odpowiednie położenie zwierciadła *V* osiąga się za pomocą pręta *m n*, na którym nacięta jest linia śrubowa, przesuwająca przy obracaniu pręta podstawę, podtrzymującą toż zwierciadło. Tutaj więc obserwator patrzy istotnie, jak przy lunetach, w tym samym kierunku, w jakim znajduje się przedmiot badany, przyczem nie zatrzymuje głową swoją części promieni świetlnych. Natężenie światła w tym teleskopie ulega znacznemu osłabieniu po pierwsze dlatego, że powierzchnia

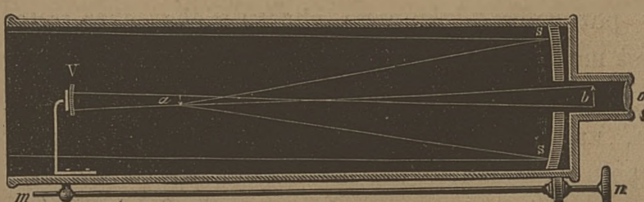


Fig. 329. Działanie teleskopu Gregory'ego.

zwierciadła nie jest ciągła, lecz w samym środku przedziurawiona, powtóre zaś głównie z powodu powtórnego odbicia od małego zwierciadła *V*. W zamian teleskop Gregory'ego przedstawia tę korzyść, że pozwala objąć dość szerokie pole widzenia tak, że względnie łatwo jest za pomocą tego przyrządu odszukać pojedyńcze przedmioty na niebie. Oprócz tego, widziany przezeń obraz jest prosty tak, że może on także służyć jako teleskop ziemski.

Teleskopy o zwierciadłach metalowych przedstawiają kilka znacznych niedogodności: najprzód objektyw jest bardzo ciężki w razie, gdy rura posiada dość duży otwór, następnie zwierciadło metalowe często musi być odpolerowywane, albowiem psuje się pod wpływem wilgoci atmosferycznej, to zaś wymaga ciężkiej i żmudnej pracy. Niedogodności te zmniejszył znakomity fizyk

Foucault; przygotował on objektyw nie z metalu, lecz ze szkła i nadał mu kształt prawie dokładnie paraboliczny tak, że jednocześnie zmniejszył jego ciężar i usunął wpływ kulistej aberracyi. Zwierciadło szklane pokrywał bardzo cienką warstwą srebra, która łatwo daje się odnawiać. Foucault zbudował w r. 1862 podobny przyrząd, urządzenie którego jest takie same, jak w teleskopie Newtona. Przedstawia go w całości oboczna tablica. Znajduje się on w obserwatoryum astronomicznem w Marsylii, gdzie oddał nauce wielkie usługi. Objektyw jego ma w średnicy 80 cm., a odległość ogniskowa równa się 4,50 metra; okular zaś posiada dokładnie budowę złożonego mikroskopu i jest wolny od wszelkiej aberracyi. Sam teleskop ustawiony jest paralaktycznie, to znaczy, że obraca się około osi, równoległej do osi ziemskiej; dzięki temu, można z łatwością śledzić gwiazdy podczas pozornego dziennego obrotu nieba. Do przyrządu dodany jest mechanizm zegarowy, który sprawia, że szybkość tego obrotu jest równa pozornej szybkości nieba, przez co dana gwiazda, na którą raz skierowano teleskop, pozostaje ciągle w jego polu widzenia.

Chcąc mieć dokładne wyobrażenie o tem, jak wielkie usługi oddały lunety i teleskopy naukom przyrodniczym, a szczególniej astronomii, należałoby napisać całą historyę tych nauk. Przytem nie możnaby się ograniczyć na zadziwiających zjawiskach, które instrumenty te uwidoczniły dla nas, ani na mnogości światów, przez nie odkrytych, lecz musielibyśmy sobie także uprzytomnić, że dokładność obserwacyi w astronomii, jakoteż w innych pokrewnych naukach, wzrosła niesłychanie, dzięki zastosowaniu tychże przyrządów, oraz że teorye i prawa o ruchach ciał we wszechświecie dosięgły przez nie znakomitego rozwoju. Na uczynienie zaś tego nie pozwalają nam rozmiary niniejszego dzieła.

ROZDZIAŁ VI.

Rozszczepienie światła.

§ 1. Rozkład i skład białego światła.

Dotychczas rozpatrywaliśmy zjawiska optyczne niezależnie od jakości samego światła. Obecnie zobaczmy, jak się zachowują rozmaite rodzaje tego ostatniego, gdy różniąc się np. pod względem swej barwy, ulegają jednemu z wyżej opisanych zjawisk, a mianowicie—załamaniu przy przejściu przez pryzmat. Takie różne co do barwy światło można między innemi sztucznie otrzymywać przez wprowadzanie do płomienia lampy pewnych ciał; umieszczając np. na dolnym z dwóch węgli lampy elektrycznej maleńki kawałek metalu, zwanego *sodem*, zabarwiamy przez to płomień na piękny żółty kolor. W celu ułatwienia odnośnych doświadczeń, lampa jest tak urządzona, że światło wychodzi z niej przez pionową szczelinę pod postacią wązkiej smugi równoległych promieni. Ustawmy na ich drodze, w stosownem miejscu, wypukłą soczewkę, a otrzymamy na ekranie wyraźny obraz szczeliny, o barwie, zależnej od ciała, jakie w danym razie do płomienia zostało wprowadzone. Przypuśćmy, że płomień został zabarwiony przez sód na żółto, obraz więc na ekranie wypada żółty. Jeżeli teraz, tuż po za soczewką, stanie pryzmat, to owe promienie zostaną odchylone ku jego podstawie, a żółty obraz szczeliny utworzy się na ekranie w innem, niż poprzednio, miejscu. Wprowadziwszy zaś do płomienia lampy takie ciało, które zabarwia go na kolor czerwony, np. metal *lityn* i otrzymawszy najprzód, jak powyżej, bezpośredni obraz szczeliny, potem zaś jej obraz odchylony przez tenże sam pryzmat, przekonamy się, że odchylenie promieni czerwonych jest mniejsze, niż to, jakiemu przedtem uległo światło żółte. Podobne doświadczenia, wykonywane ze światłem innej barwy, np. zielonem (metal *tal*), błękitnem (metal *ind*) i t. d. przekonywają, że promienie zielone zostają bardziej odchylone niż żółte i że najsilniejszemu odchyleniu ulegają promienie fioletowe. Łamliwość tedy różnych

rodzajów promieni jest niejednakowa: *w jednym i tym samym pryzmacie światło czerwone załamuje się najsłabiej, fioletowe zaś — najsilniej.* Można się o tem przekonać także za pomocą następujących, daleko prostszych doświadczeń. Zabarwia się mianowicie jednę połowę kawałka papieru na czerwono, drugą zaś na niebiesko i rozpatruje go przez pryzmat, którego krawędź załamująca zwrócona jest ku górze; wydaje się wtedy, że obydwie połowy papieru nie leżą w jednej płaszczyznie; niebieska wydaje się wyżej położona od czerwonej, co dowodzi, że promienie niebieskie zostają silniej odchylone, niż czerwone (fig. 330). Umieściwszy ten sam dwubarwny papier, dobrze oświecony, przed ogniskiem głównem dwuwypukłej soczewki, otrzymamy rzeczywisty jego obraz na białym ekranie, przyczem przekonamy się, że ekran musi znajdować się na różnej od soczewki odległości, zależnie od tego, czy obraz czerwonej lub też niebieskiej połowy ma na nim wystąpić w całej swej wyrazistości. Znajdziemy też z łatwością, że odległość, na jakiej obraz niebieski zupełnie wyraźnie się pojawia, jest mniejsza od tej, przy której osiągamy to samo dla czerwonego obrazu, a zatem światło niebieskie załamuje się silniej, niż czerwone. Dwa opisane tutaj doświadczenia należą do najpierwszych, jakie podaje Newton w swej optyce.

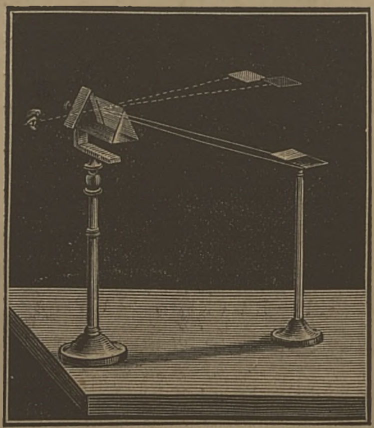


Fig. 330. Niejednakowa łamliwość promieni o różnej barwie.

Gdy warunki doświadczenia w taki sposób są zmodyfikowane, że do płomienia zostają wprowadzone jednocześnie wszystkie cztery powyższe metale, wtedy bezpośredni obraz szczeliny, jaki soczewka rzuca na ekran, nie jest zabarwiony na żaden z wymienionych czterech kolorów, lecz posiada barwę *białą*. Przy udziale zaś pryzmatu, zamiast pojedyńczego białego, tworzą się na ekranie cztery różnie zabarwione obrazy: *czerwony*, *żółty*, *zielony* i *niebieski*, każdy na właściwem sobie miejscu.

Widzimy tedy, że owe białe światło, wychodzące z lampy, składa się w istocie z różnych co do barwy i zmieszanych razem promieni; przy przejściu przez pryzmat rozkłada się ono na swoje prostsze składniki, albowiem każdy z tych ostatnich załamuje się inaczej. Taki rozkład światła zowie się *rozszczepieniem*. Każdemu zjawisku załamania światła złożonego towarzyszy rozszczepienie jego na składniki prostsze, a ta sama metoda, którą widzieliśmy wyżej zastosowaną do rozkładu światła lampy elektrycznej, gdy w płomieniu jej znajdują się pary różnych metali, może także służyć do rozkładu czystego, elektrycznego, albo też jakiegokolwiek innego światła. Co do światła słonecznego, to rozkład jego pierwszy zauważył i zbadał Newton. Wpuścił on

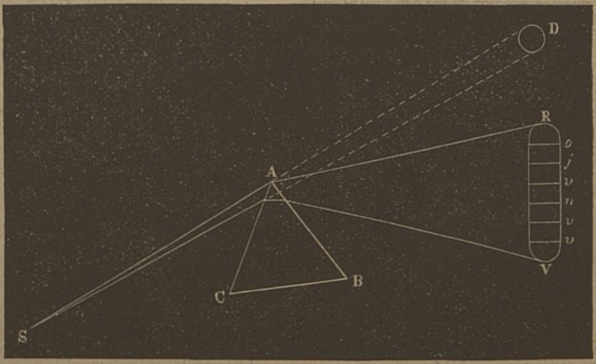


Fig. 331. Rozkład światła słonecznego przy przejściu przez pryzmat.

do ciemnego pokoju, przez bardzo mały okrągły otwór (S) poziomą wiązkę promieni słonecznych, które na przeciwległym ekranie w D utworzyły biały i okrągły obraz słońca (fig. 331). Następnie na drodze tych promieni umieścił pryzmat $C\,A\,B$ (krawędź załamująca jest w A), a wtedy wiązka światła nie tylko uległa odchyleniu, lecz także rozszczepiła się, tworząc na ekranie wydłużony prostokąt $R\,V$ o zaokrąglonych brzegach i szerokości, równej średnicy białego obrazu w D, długość zaś szła w kierunku głównego przecięcia pryzmatu. Prostokąt ten, zabarwiony na całej swej długości najwspanialszemi kolorami, stanowi pewną formę t. zw. *widma słonecznego*. Przedstawia ono najprzód w R

ciemną czerwień, która staje się stopniowo coraz jaśniejsza i przechodzi nieznacznie w barwę pomarańczową. Z kolei ta ostatnia przechodzi w żółtą, ta—w zieloną, zielona— w jasno-niebieską, poczem idą: ciemno-niebieska (błękit) i fiolet. Właściwie liczba odcieni barw jest tutaj nieskończenie wielka, odróżnia się wszakże tylko siedem głównych, idących po sobie we wskazanym porządku (patrz tablicę chromolitografowaną, widmo № 1). Newton, w celu objaśnienia powstawania widma przyjął, że białe światło składa się z nieskończonej ilości promieni pojedyńczych, których łamliwość wzrasta stopniowo, począwszy od czerwonych, aż do fioletowych i które odszczepiają się jeden od drugiego przez załamanie. Doświadczenia, opisane na początku niniejszego § pokazują, jak należy sobie tłómaczyć tworzenie się widma słonecznego. Każdy pojedyńczy rodzaj promieni, zawartych w wiązce białego światła słonecznego, padającego na pryzmat, daje na ekranie obraz dokładnie w tem miejscu, które odpowiada jego łamliwości. Widmo należy tedy uważać za nieskończony szereg takich obrazów, zlewających się w jedną smugę. To samo dotyczy sposobu powstawania widm innych źródeł światła. Widmo światła elektrycznego składa się z tych samych barw i idących w tym samym porządku, co i słoneczne. Niekiedy też widmo może się składać z kilku tylko barwnych linij, albo nawet z jednej, np. widmo pierwiastku *talu*, utworzone jest z jednej zielonej linii. Liczba różnobarwnych linii zależy oczywiście od ilości rodzajów pojedyńczych promieni, wchodzących w skład danego światła. Takie widmo z kilku lub kilkunastu linii, nazywamy *przerywanem* w przeciwstawieniu do *ciągłego*, jakiem jest np. widmo światła elektrycznego. Łatwo można pokazać, że oddzielne barwy widma są jednorodne czyli pojedyńcze, to znaczy, iż więcej nie dają się już rozszczepić. W tym celu rzućmy

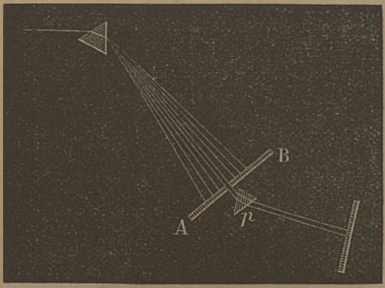


Fig. 332. Barwy widma nie rozszczepiają się.

widmo białego światła na ekran $A\ B$ (fig. 332), w którym znajduje się wązka pionowa szczelina; niechaj ta ostatnia wypada np. tam, gdzie jest barwa żółta, wtedy tylko światło żółte, odpowiadające temu miejscu, przejdzie po za ekran. Ustawmy za nim drugi pryzmat *p*, a przekonamy się, że rzeczone światło nie ulegnie już rozszczepieniu: po wyjściu z drugiego pryzmatu zachowa ono pierwotną swą żółtą barwę i zostanie tylko jeszcze bardziej odchylone. To samo ma miejsce ze wszystkiemi pozostałemi barwami widma.

Z powyższego wynika, że chcąc przy poszukiwaniu praw załamania światła być niezależnym od wpływu rozszczepienia, należy zawsze posługiwać się światłem jednorodnem.

Jeżeli białe światło daje się rozłożyć na oddzielne barwy widmowe, to naodwrót, przy połączeniu wszystkich tych barw, powinno powstać także światło białe. Doświadczenia w zupełności potwierdzają ten wniosek. Najprostsze z nich polega na tem, że na drodze wiązki białego światła, rozszczepionej przez pryzmat (fig. 333), stawia się dużą dwuwypukłą soczewkę *l*, a po za nią ekran, umieszczony w punkcie *f*, sprzężonym z punktem *s*, w którym promienie opuszczają pryzmat. Soczewka zbiera padające na nią promienie i rzuca na ekran obraz tylnej płaszczyzny pryzmatu; *obraz ten jest biały*. A oto inne, bardzo często pokazywane doświadczenie: Krążek tekturowy, podzielony promienisto na wycinki, którym nadano kolejno główne barwy widma słonecznego, wprawia się w bardzo szybki ruch obrotowy (fig. 334, str. 500). Barwa jego podczas tego ruchu *wydaje się białą*, albo przynajmniej jasnoszarą, pod warunkiem wszakże, że kolory są dobrze dobrane i że pojedyńcze wycinki mają odpowiednią względną szerokość. Po-

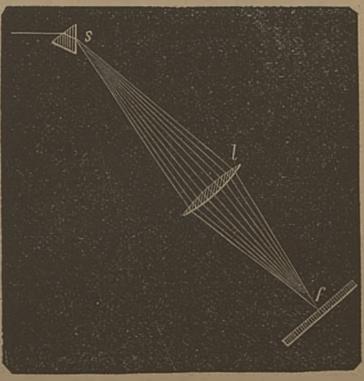


Fig. 333. Połączenie barw widma w białe światło.

chodzi to ztąd, że oko, podobnie jak ucho, zachowuje przez pewien przeciąg czasu otrzymane wrażenie; wrażenie jednej barwy krążka jeszcze nie przeszło, gdy już wszystkie pozostałe zdołały

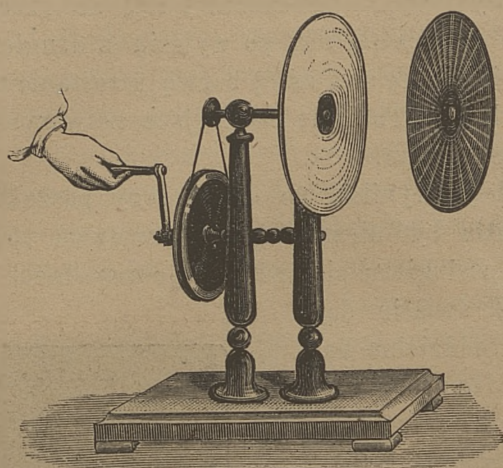


Fig. 334. Połączenie barw obracającego się krążka w barwę białą.

wywrzeć nowe wrażenia, które zlewają się z pierwszem w jedno; wpływ jest taki sam, jak gdyby z każdego punktu dochodziły do oka promienie wszystkich barw i dlatego krążek wydaje się białym, albo (przy słabszem natężeniu światła) szarym.

§ 2. Barwy dopełniające. Klasyfikacya barw. Teorya tęczy.

Widzieliśmy, że biel jest mieszaniną barw widma słonecznego. Jeżeli zaś z tego ostatniego odejmiemy pewną barwę, to pozostałe nie dadzą już bieli, jak o tem przekonać się można w następujący sposób: ustawmy za soczewką l, na drodze wychodzącej z niej wiązki rozszczepionego białego światła, pryzmat p (fig. 335, str. 501) tak, ażeby padły nań np. promienie czerwone i pomarańczowe; te ulegają odchyleniu i tworzą na ekranie w n *czerwonawy* obraz. Pozostałe zaś promienie, wychodzące z soczewki, to jest żółte, zielone, niebieskie i fioletowe zbierają

się w *f* i dają tutaj obraz *zielonawy.* Dwie te mieszaniny: czerwonawa i zielonawa, połączone w jedną, muszą dać biel, albowiem każda z nich zawiera promienie, których brak w drugiej do uzupełnienia bieli. Dwie barwy, które, zmięszane z sobą, dają biel, zowią się *dopełniającemi.* Przesuwając pryzmat *p* wzdłuż soczewki i odchylając coraz to inne promienie, przekonywamy się, że oprócz zielonawo-niebieskiej z czerwoną, dopełniają się także: żółta z ciemno-niebieską, zielonawo-żółta z fioletową, pomarańczowa z jasno-niebieską. Z tego wynika, że dla wywołania w oku naszem wrażenia bieli, nie koniecznem jest jednoczesne działanie wszystkich barw widma słonecznego; w tym celu wystarczają już, jak to ostatecznie wykazał Helmholtz, dwie odpowiednio dobrane barwy jednorodne. Począwszy od czerwieni widma do miejsca, gdzie pojawia się zieleń, można znaleść barwę dopełniającą dla każdej z tych, które ciągną się od początku niebieskiej do końca fioletu. Tylko barwa zielona w widmie nie posiada pojedyńczej barwy dopełniającej, lecz złożoną, a mianowicie purpurową. Należy dodać jeszcze, że dwie barwy dopełniające dają także biel wtedy, gdy mięsza się je z dowolną ilością białej barwy; gdy natężenie światła bieli jest słabe, to odbieramy wrażenie szarości; czerń zaś oznacza mniej lub więcej zupełny brak wszelkiego światła.

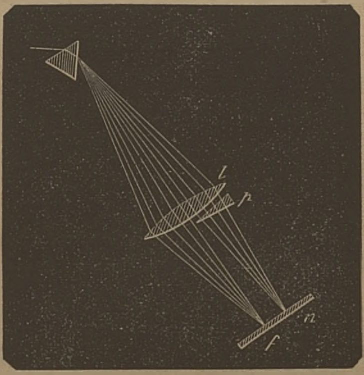


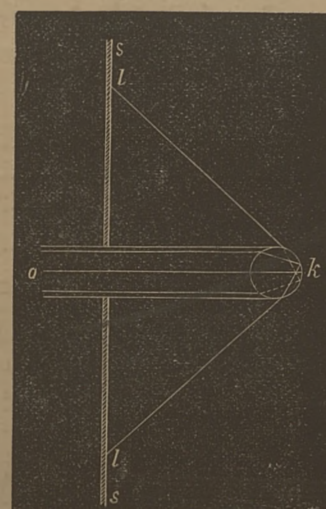
Fig. 335. Barwy dopełniające.

Jakkolwiek należy przyjąć, że liczba pojedyńczych i złożonych barw jest ogromna, oraz że przez ich kombinacye można ją jeszcze bez końca powiększać, to jednak zaprzeczyć się nie da, że wrażliwość pod tym względem oka naszego nie jest nieskończona, może ono bowiem dokładnie odróżnić tylko ograniczoną ilość odcieni barwnych. Lecz nawet i ta ograniczona skala oka jest jeszcze bardzo rozległa; dość przypomnieć niezmierne bo-

gactwo barw w naturze, wyraźnie przez oko rozróżnianych: kolory liści i kwiatów u roślin, pokrycia u zwierząt, upierzenia u ptaków, skrzydeł u motyli i innych owadów, wreszcie delikatne barwne odcienia niektórych minerałów i muszli stanowią ogniwa długiego szeregu barw naturalnych, nieznacznie, zaledwie dostrzegalnie, przechodzących jedna w drugą i składających się na owo bogactwo. Liczba barw, używanych w sztuce i przemyśle, jest o wiele mniejsza, zawsze jednak tak znaczna, że wymaga koniecznie racyonalnej klasyfikacyi, która pozwalałaby, według pewnych zasad, sprowadzić każdy odcień do kilku typów głównych i wytłómaczyć, w jaki sposób on z nich powstał. Znakomity chemik Chevreul podał kilka takich zasad, podług których możliwie dokładnie odróżniać można rozmaite barwy w ich przeróżnych stopniowaniach. W celu wprowadzenia określonych nazw dla modyfikacyi barw, Chevreul nazywa stopniowania jednej i tej samej barwy, różniące się tylko przymieszką bieli lub czerni, *tonami* tejże barwy, szereg takich tonów stanowi *gamę*, jej zaś tony, począwszy od czystej barwy do zupełnie białej, są coraz wyższe, w kierunku zaś czerni—coraz niższe. Zmiana, jaka zachodzi wskutek przymieszki innej czystej barwy, nie powodującej przyciemnienia, zowie się *odcieniem*. Ażeby otrzymać najprzód wielką liczbę odcieni, dzieli on powierzchnię krążka na 72 jednakowe wycinki i umieszcza na trzech z nich, wzajemnie równo oddalonych od siebie, wełniane prążki, z których jeden zabarwiony jest na czerwono, drugi na żółto, trzeci na niebiesko i to możliwie czystemi barwami, o jednakowem natężeniu. Pomiędzy te prążki wsuwa on dalej, w równych odstępach, jeden pomarańczowy—pomiędzy czerwony i żółty, jeden zielony—pomiędzy żółty i niebieski i jeden fioletowy—pomiędzy niebieski i czerwony. W podobny sposób wstawia on ustawicznie nowe odcienie pomiędzy dwa już znalezione i otrzymuje przez to krążek czystych barw, który w pewnej mierze może być uważany jako naśladowanie widma słonecznego (patrz Tablicę chromolitografowaną); zawiera on 72 odcienie, a dla każdego z nich istnieje całkowita gama z dwudziestu tonów, różniących się, jak już powiedzieliśmy, większą lub mniejszą przymieszką

bieli albo czerni, przyczem dziesiąty ton gamy zawsze przedstawia czysty odcień. Oczywiście, że tak rozległa skala powinna w zupełności wystarczyć do wszystkich celów nauki i przemysłu oraz zadawalniać wszelkie wymagania artystów malarzy przez długi jeszcze przeciąg czasu.

W jednym z dalszych dopiero rozdziałów zajmiemy się obszernie wyjaśnieniem całej różnorodności barw, jaką przedstawiają ciała nas otaczające, tymczasem zaś postaramy się wytłómaczyć bliżej jedno z najwspanialszych zjawisk rozszczepienia światła słonecznego, tak jak ono zachodzi w naturze. Mówimy tutaj o *tęczy*, którą dostrzegamy na niebie gdy, zwróceni plecami do niezakrytego słońca, patrzymy na chmurę deszczową. Następujące piękne doświadczenie ([1]) pokazuje, w jaki sposób powstaje tęcza przez załamanie i wewnętrzne odbicie promieni słonecznych w kulistych kroplach deszczu. Na szklaną kulę *k*, mającą 4 centym. w średnicy i napełnioną wodą, skierowuje się poziomą wiązkę promieni słonecznych, której szerokość równa się średnicy kuli (fig. 336); przed kulą zaś ustawiony jest duży ekran *s s*, mający pośrodku otwór do przepuszczania padających nań promieni. Na ekranie tym pojawia się wówczas wspaniałe wielobarwne koło, otaczające otwór; jestto koliste widmo, którego barwy ułożone są współśrodkowo, najbardziej na zewnątrz widać czerwoną, na wewnątrz zaś—fioletową. Nieco dalej od środka ekranu widać drugie takie koło, lecz



Fig, 336. Dwukrotne załamanie, połączone z wewnętrznem odbiciem w kuli, napełnionej wodą,

([1]) Opis tego doświadczenia, wykonanego przez Lomela wyjmujemy z kilkakrotnie już przytoczonego wyżej dzieła jego, którem w ogóle przy opracowaniu niniejszej księgi często się posługujemy.

o znacznie słabszem natężeniu świetlnem i którego barwy idą w odwrotnym niż w pierwszem kole porządku: czerwona znajduje się na wewnątrz, fioletowa zaś na zewnątrz.

W jaki sposób powstają dwa te widma koliste? Pierwsze powstaje z promieni, które uległy dwukrotnemu załamaniu, t. j. przy wejściu i wyjściu z kuli oraz jednorazowemu wewnętrznemu odbiciu od tylnej jej ściany. Padają one na ekran dopiero po przebyciu tej łamanej drogi, są więc odchylone od pierwotnego swego kierunku. Jedynie promień *o* czyli środkowy nie ulega odchyleniu, gdyż padając prostopadle na przednią i tylną powierzchnię kuli, powraca też tą samą drogą, jaką przyszedł. Co się tyczy pozostałych promieni, to zostają one odchylone tem więcej, im dalej biegną od środkowego, w pewnej zaś odeń odległości odchylenie ich osiąga *największą* wartość, poczem znów stopniowo się zmniejsza aż do najbardziej skrajnych. Posuwając się stopniowo od promieni najbardziej odchylonych do najskrajniejszych z jednej i do środkowego z drugiej strony, spostrzegamy, że *odchylenie z początku zmienia się bardzo nieznacznie, następnie zaś bardzo szybko.* Z tego wynika, że promienie, sąsiadujące z temi, które mają uledz największemu odchyleniu, po wyjściu z kuli biegną również blizko tych ostatnich, towarzyszą im jakby i wzmacniają ich natężenie świetlne na ekranie. Przeciwnie te, które padają blizko jeden drugiego, w innych miejscach kuli, po powtórnem załamaniu wychodzą z niej jako silnie rozbieżne i padając na ekran, nie wywolują na nim żadnego znaczniejszego oświetlenia. Promienie więc najsilniej odchylone, tworzące na ekranie obwód koła barwnego, powodują tutaj oświetlenie bez porównania silniejsze, niż w jakimkolwiek punkcie wewnątrz koła. Jeżeli do doświadczenia służy światło jednorodne, np. czerwone, wtedy na ekranie widać *słabo oświetloną* kolistą powierzchnię, ograniczoną przez *bardzo jasną* okrągłą linię czerwoną: tworzą ją oczywiście promienie najbardziej odchylone. Kąt największego odchylenia, t. j. kąt, jaki tworzą kierunki *o k* i *k l* (fig. 336), wynosi dla promieni czerwonych 42^0. Światło pomarańczowe, żółte, zielone i t. d. wywołałoby zjawisko zupełnie analogiczne, z tą tylko różnicą, że koła przez nie

na ekranie utworzone, byłyby coraz mniejsze, w miarę coraz to większej łamliwości odnośnych promieni: najmniejsze koło dałyby fioletowe, dla których kąt największego odchylenia jest prawie o 1° mniejszy, niż dla czerwonych. Jasnem więc jest teraz, dlaczego przy użyciu światła białego, na ekranie pojawiają się współśrodkowe koła wszystkich barw widma słonecznego: czerwone najdalej, fioletowe zaś najbliżej środka tych kół.



Fig. 337. Dwukrotne załamanie połączone z dwukrotnem wewnętrznem odbiciem w kuli, napełnionej wodą.

Drugie barwne koło powstaje przez promienie, które ulegają dwukrotnemu załamaniu i dwukrotnemu także wewnętrznemu odbiciu od ścian kuli (fig. 337); znacznie słabsze natężenie jego pochodzi właśnie od tego wielokrotnego odbicia. Odchylenie, do jakiego zdolne są takie promienie, wynosi najmniej około 51° dla czerwonych, nieco zaś więcej dla fioletowych.

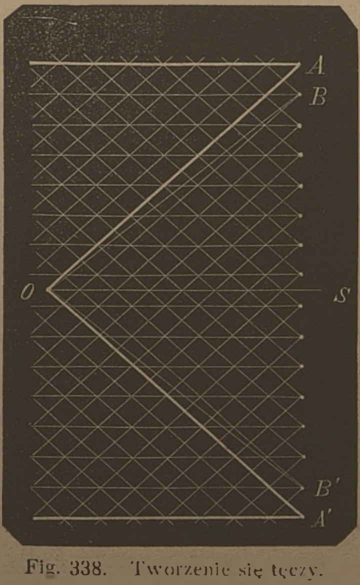


Fig. 338. Tworzenie się tęczy.

Każda kropla deszczu działa podobnie jak szklana kula w powyższem doświadczeniu. Niechaj *O* wyobraża oko obserwatora, patrzącego na przeciwległą słońcu chmurę deszczową, której oddzielne krople przedstawione są pod postacią grubych kropek (fig. 338). Z rzeczonych kropel tylko te, których odległość kątowa od punktu *S* nieba, przeciwległego słońcu, wynosi mniej więcej 42°, wysyłają do oka jednorazowo odbite w nich dostatecznie silne promienie; wychodzące zaś z innych kropel, przechodzą mimo oka niedostrzeżone. Warunkowi temu odpowiadają np. krople *A A'* i *B B'*; z tych pierwsze, jako bardziej oddalone od punktu *S*, wysyłają

promienie czerwone, z kropel zaś *B B'* przychodzą słabiej odchylone promienie fioletowe. Oko widzi tedy wokoło *S* łuk, którego barwy idą w takim porządku, jak ich łamliwość: fioletowa najbardziej na wewnątrz, czerwona—na zewnątrz. Ten łuk tęczowy zowie się *głównym*, w odróżnieniu od drugiego, znacznie bledszego i powstającego przez promienie, które w kroplach deszczowych uległy dwukrotnemu załamaniu i takiemuż wewnętrznemu odbiciu (patrz wyżej fig. 337); jego odległość kątowa od punktu *S* wynosi 51°. Czytelnik, na podstawie powyższych objaśnień łatwo już zrozumie, dlaczego w tym łuku tęczowym barwy idą w odwrotnym porządku: czerwona na wewnątrz, fioletowa zaś na zewnątrz—niż w głównym. Tęcza, widziana przez nas, stanowi większą lub mniejszą część koła, zależnie od wysokości słońca na niebie. Ta, którą dostrzegamy prawem okiem, utworzona jest przez inne krople, niż widziana okiem lewem, lub okiem innego człowieka.

§ 3. Achromatyzm.

Pryzmaty z rozmaitych substancyj posiadają niejednakową zdolność rozszczepiania przechodzącego przez nie złożonego światła. Np. pryzmaty: flintglasowy, krownglasowy oraz wydrążony i napełniony wodą—każdy o kącie załamującym równym 60°—powodują nietylko różne odchylenie, ale dają także rozmaicie długie widma: najwięcej odchylone i najdłuższe daje pryzmat z flintglasu; najmniej zaś odchylone i najkrótsze—pryzmat wodny. Można przygotować pryzmat krownglasowy, który odchyla pewien określony rodzaj światła na tyleż, co i krownglasowy o kącie załamującym równym 60°; pierwszy pryzmat musi jednak wówczas posiadać mniejszy kąt załamujący, niż drugi, mianowicie kąt równy tylko 52°. Otóż pryzmat flintglasowy daje wtedy widmo prawie dwa razy dłuższe, niż krownglasowy, z czego wynika, że zdolność rozszczepiania światła jest dla pierwszego gatunku szkła prawie dwa razy większa, niż dla drugiego. Dwa zaś pryzmaty z jednakowego materyału i o kątach załamujących równych (krownglasowe np. o kącie 60°) powodują

jednakowe odchylenie oraz widma. Jeżeli tedy ustawimy je obok siebie, lecz tak, ażeby wierzchołek jednego był zwrócony ku dołowi, drugiego zaś ku górze (fig. 339), wtedy działania ich znoszą się wzajemnie: białe światło, które wchodzi do pierwszego pryzmatu, gdzie ulega odchyleniu i rozszczepieniu, doznaje w drugim pryzmacie równego odchylenia, lecz w kierunku wprost przeciwnym, a promienie rozszczepione łączą się napowrót. Światło wychodzi więc z drugiego pryzmatu równolegle do pierwotnego swego kierunku i daje na ekranie obraz *biały*. Widzimy, że owe skombinowane dwa pryzmaty działają tak samo, jak tafla szklana o ścianach równoległych, która nie powoduje odchylenia, ani też rozszczepienia światła. Gdy natomiast w podobny sposób kombinuje się pryzmat krownglasowy o 60^0 z flintglasowym o 52^0 (fig. 340), wtedy odchylenie przechodzącego przez nie białego światła, dla niektórych przynajmniej promieni, zostaje prawie zupełnie usunięte, lecz światło to wychodzi z drugiego pryzmatu jako rozszczepione, dlatego, że jak powiedzieliśmy wyżej, flintglas posiada dwa razy większą zdolność rozszczepiania, niż krownglas. Na ekranie pojawia się wtedy w kierunku bezpośrednich promieni widmo, prawie tak długie, jak to, które dałby sam pryzmat krownglasowy, lecz o barwach, idących w porządku odwrotnym. System szkieł, nie wywołujący odchylenia, składa się zwykle z trzech lub pięciu pryzmatów; stanowi on jakby jeden pryzmat bez odchylenia (à vision directe). Części jego składowe sklejone są razem za pomocą przezroczystego t. zw. balsamu kanadyjskiego. Pryzmat flintglasowy, którego kąt załamujący wynosi około połowy takie-

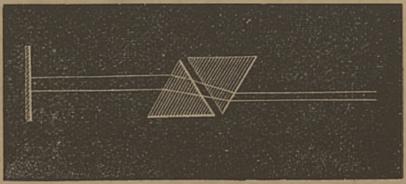


Fig. 339. Kombinacya dwóch jednakowych pryzmatów, przy której nie zachodzi żadne odchylenie ani rozszczepienie światła.

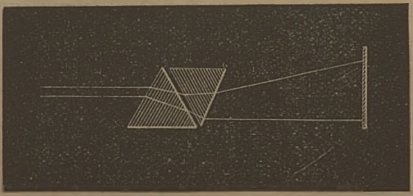


Fig. 340. Kombinacya pryzmatu krown- z flintglasowym, przy której światło ulega rozszczepieniu i nieznacznemu tylko odchyleniu.

goż kąta w pryzmacie krownglasowym, daje widmo tej samej długości, co i ten ostatni. Jeżeli tedy dwa takie pryzmaty (krownglasowy o 60° i flintglasowy o 30° prawie) skombinujemy jak w dwóch poprzednich wypadkach, t. j. odwrotnie je ustawimy (fig. 341), wtedy drugi z nich usunie rozszczepienie światła, spowodowane przez pierwszy, odchylenie zaś zostanie tylko zmniejszone. Na ekranie pojawi się nieznacznie tylko odchylony i *biały* obraz. System pryzmatów, nie wywołujący rozszczepienia, zowie się *achromatycznym* (bezbarwnym).

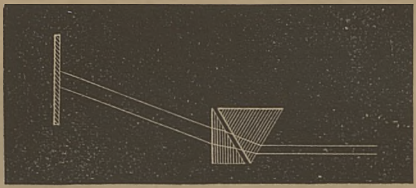


Fig. 341. Kombinacya pryzmatu krown- z flintglasowym, przy której zachodzi tylko odchylenie, lecz nie rozszczepienie światła (pryzmat *achromatyczny*).

Przechodząc obecnie do soczewek, jako do ciał załamujących światło, musimy raz jeszcze rozważyć dotyczące ich działania prawa: (poznaliśmy je już wyżej, patrz str. 466); są one mianowicie ścisłe tylko w razie, gdy przechodzące przez soczewkę światło jest jednorodne. W przeciwnym razie, gdy np. pada na nią światło białe, wtedy oddzielne jego promienie, po wyjściu z niej, nie przecinają już osi soczewki w jednym punkcie, rzeczone bowiem światło zostaje przytem rozszczepione na mnóztwo pojedyńczych promieni, o różnej łamliwości. Fioletowe, jako najbardziej łamliwe, przecinają oś najbliżej soczewki, w punkcie *v* (fig. 342); czerwone zaś, jako najmniej łamliwe—najdalej w punkcie *r*, a promienie o innych barwach zbiorą się między *v* i *r*. W ogóle tedy soczewka nie może w jednym punkcie zebrać promieni, wychodzących z białego lub w ogóle z wielobarwnego punktu. Zjawisko to jest znane pod nazwą *aberracyi chromatycznej*. Ono to stanowi przyczynę, dla której obrazy, rzucane przez zwykłe so-

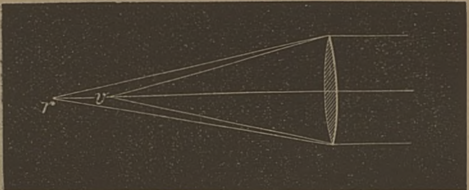


Fig. 342. Rozszczepienie światła przez soczewkę.

czewki, nie są nigdy ostro odgraniczone, lecz otoczone niejasną barwną obwódką. Względna wielkość miejsc, zajętych przez te barwy, a nadto ich ilość oraz porządek, w jakim występują na obrazie, zależą oczywiście od odległości ekranu od soczewki. Jeżeli np. ten ostatni znajduje się bliżej soczewki, niż ognisko *v* dla fioletowych promieni, to obwódka będzie przedstawiała wszystkie barwy widma, z czerwienią najbardziej na zewnątrz wysuniętą; gdy natomiast ekran odsuniemy aż po za ognisko *r* dla czerwonych promieni, wtedy barwy obwódki będą szły w porządku odwrotnym i fiolet wypadnie na zewnątrz.

Luneta lub mikroskop, w których obrazy byłyby zabarwione, przedstawiałyby wskutek aberracyi chromatycznej niewielką tylko wartość naukową. Usunięcie rozszczepienia światła w soczewkach—w możliwość czego Newton zupełnie był zwątpił—stanowiło dla praktycznej optyki zadanie pierwszorzędnej wagi; dopiero też, gdy Hall (r. 1733) i Dollond (r. 1757) zdołali zadanie to rozwiązać, można było zbudować refraktory, odpowiadające wymaganiom nauki. Powyższe dane



Fig. 343. Soczewka achromatyczna,

o pryzmacie achromatycznym z łatwością objaśnią nas co do sposobu, w jaki przygotowuje się soczewkę achromatyczną. Pojedyńczą oczywiście być ona nie może, składa się też zwykle z dwóch soczewek, które muszą być tak dobrane, ażeby wzajemnie usuwały swe rozszczepienia. W tym celu, po za daną soczewką, umieszcza się inną o działaniu wprost przeciwnem, która, posiadając taką samą zdolność rozszczepiania, co i tamta, powoduje jednak inne odchylenie, a to z powodu różnej odległości ogniskowej. Kombinuje się np. wypukłą soczewkę krownglasową z wklęsłą flintglasową; ażeby obydwie wywołały jednakowe rozszczepienie, lecz w kierunkach przeciwnych, urojona odległość ogniskowa dla tej ostatniej musi być prawie dwa razy większa, niż rzeczywista odległość ogniskowa dla soczewki wypukłej. Kombinacya taka daje *soczewkę achromatyczną* (fig. 343), za pomocą której otrzymuje się biały obraz danego punktu, je-

żeli promienie, padające na nią z tego ostatniego, są białe. Soczewki, wchodzące w skład podobnego systematu achromatycznego, były z początku dobierane w sposób empiryczny, to jest przez próbowanie. Ściślejszą jednak i doskonalszą drogą, prowadzącą do tego celu, jest uprzednie wyliczenie najodpowiedniejszego kształtu obydwóch soczewek. Do tego zaś potrzebna jest dokładna znajomość spółczynników załamania danych gatunków szkła dla rozmaitych pojedyńczych czyli jednorodnych promieni. Otóż Fraunhofer'owi udało się, na podstawie pewnych zasad, które wkrótce poznamy, ściśle zmierzyć rzeczone wielkości, przez co z kolei mógł on przygotować achromatyczne szkła pierwszorzędnej wartości.

W dobrych przyrządach optycznych aberracya chromatyczna zwykle bywa usuniętą. Zwyczajna nawet lupa może składać się z kilku rozmaitych soczewek, które tworzą z niej system achromatyczny; jeżeli przytem krzywizny jej powierzchni tak są dobrane, że znika także aberracya kulistości, wtedy lupa jest jednocześnie i aplanatyczną. Objektyw i okular w dokładnym mikroskopie złożonym również są aplanatyczne i achromatyczne. To samo dotyczy dobrych lunet i teleskopów.

ROZDZIAŁ VII.

Analiza spektralna.

§ 1. Linie Fraunhofer'a. Widmo słońca.

Jednem z największych odkryć Newtona w zakresie optyki było wykazanie, że wiązka białego słonecznego światła, przechodząc przez pryzmat, rozkłada się na mnóztwo pojedyńczych promieni i tworzy widmo słoneczne. Metoda, jakiej z początku użył uczony angielski do otrzymania tego widma (patrz str. 497), odpowiadała celowi, była jednak niewystarczającą do ściślejszych badań nad składem światła słonecznego i nie mogła wykazać czy w widmie tego ostatniego brak lub nie pewnych barwny

linii. Przy powyższej metodzie tworzy się bowiem na ekranie mnóztwo okrągłych i jednakowo wielkich obrazów słońca, o różnej barwie, które zachodzą jedne na drugie tak, że w danem miejscu widma znajduje się ich jednocześnie wielka ilość, co uniemożliwia skonstatowanie ewentualnego braku pewnego barwnego odcienia. Fig. 344 illustruje to szematycznie, lecz bardzo wyraźnie. W obec tego nie można się dziwić, że Newton sądził, iż widmo słoneczne stanowi *ciągłą* smugę barwnych linii, o wszelkiej łamliwości. Obecnie używana metoda różni się od poprzedniej pod tym głównie względem, że potrzebne światło słoneczne przepuszcza się przez wązką pionową szczelinę i że zanim pada na pryzmat, przechodzi ono przez achromatyczną soczewkę zbierającą; urządzenie więc jest takie same, jak w doświadczeniach, opisanych na początku rozdziału VI. Widmo słoneczne, otrzymane w podobnych warunkach, jest tem czystsze i tem doskonalej rozszczepione na pojedyńcze barwy, im węższą jest owa szczelina. W każdem miejscu widma, obrazy tej ostatniej są ułożone jeden obok drugiego, nie zachodząc na siebie wzajemnie; jeżeliby zaś w świetle, padającem na ekran, brakowało promieni o pewnej łamliwości, wtedy miejsce, odpowiadające tym promieniom, powinnoby odznaczać się jako ciemna linia lub prążek na jasnem, barwnem tle.

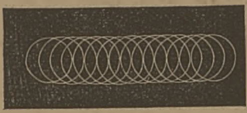


Fig. 344. Niewyraźne widmo, otrzymane przy użyciu okrągłego otworu.

Przypatrzmy się teraz widmu słonecznemu, otrzymanemu podług ostatniej metody, a dostrzeżemy na niem liczne ciemne linie, prostopadłe do jego długości (patrz tablicę chromolitografowaną, widmo № 1). Linie te pojawiają się zarówno w widmie światła słonecznego bezpośredniego, jak i odbitego od księżyca i innych planet. Z linii tych przedstawione są tam tylko najważniejsze, lecz w istocie znane są w ilości kilku tysięcy. Zostały one po raz pierwszy na początku bieżącego stulecia zauważone przez Wollastona, który nie zwrócił jednak na nie wielkiej uwagi. Na nowo zaś odkrył je Fraunhofer i od niego też noszą

one nazwę *linii Fraunhofer'a.* Najważniejsze z nich oznaczone są literami od *A* do *H:* linia *A* wypada w ciemnej, *B* i *C*—w jasnej czerwieni; *D*—na granicy pomiędzy barwami pomarańczową i żółtą, *E*—w zieleni, *F*—na granicy pomiędzy zieloną i jasnoniebieską, *G*—w ciemno-niebieskiej i wreszcie *H*—w końcu fioletu. Jedną z najbardziej godnych uwagi jest linia *D*, składająca się właściwie z dwóch, leżących tak blizko jedna drugiej, że niepodobna ich prawie widzieć jako linie oddzielne bez użycia lunety. Otóż Fraunhofer zaobserwował także w ciągłem widmie płomienia zwyczajnej świecy jasną, żółtą linię, daleko silniej świecącą, niż pozostała jego część i zajmującą przytem—o ile pomiary ówczesne pozwalały sądzić—w widmie świecy dokładnie to samo miejsce, co ciemna podwójna linia *D* w widmie słonecznem (porównaj na tablicy widma № 1 i № 3). Następnie Swan dowiódł w sposób niewątpliwy, że owa jasno-żółta linia w widmie świecy pochodzi od chlorku sodu (zwyczajna sól), znajdującego się w powietrzu i wystarczającego w minimalnej nawet ilości do wytworzenia żółtego światła. Wniosek z tego spostrzeżenia jakby sam się nasuwał i należało przyjąć, że w przychodzącem do nas świetle słonecznem brak tych żółtych promieni, które pochodzą od sodu. Późniejsze badania wykazały oprócz tego, że inne trzy ciemne linie w widmie słonecznem odpowiadają dokładnie, pod względem położenia swego, trzem jasnym liniom w widmie wodoru. Dalej gdy Kirchhof, chcąc określić położenie jasnych linii w widmach rozżarzonych par pewnych metali, porównywał je z widmem słonecznem, dostrzegł, że np. dla wszystkich jasnych linii żelaza można znaleść odpowiednie ciemne linie w widmie słońca. Zgodność jest w tym ostatnim wypadku zadziwiająca: im więcej intensywną jest dana jasna linia, tem ciemniejszą jest odpowiadająca jej linia Fraunhofer'a; gdy pierwsza jest niewyraźna, druga również jest taką. Należy dodać jeszcze, że liczba podobnych linii żelaza doszła, dzięki następnym poszukiwaniom Angströma i Thalena, do 460.

Zachodzi obecnie niezmiernie ciekawe pytanie, dlaczego te same linie, które w widmie rozżarzonych par wydają się jasne na ciemnem tle, w widmie słonecznem naodwrót przedstawiają

KSIĘGARNIA NAKŁADOWA

H. OLAWSKIEGO

Mazowiecka Nr. 6,

POLECA:

HISTORYĘ NATURALNĄ

D-ra G. Hayeka,

zawierającą 72 tablic zoologicznych z 845 kolorowanemi figurami, 40 tablic botanicznych z 445 kolorowanemi figurami i 8 mineralogicznych z 75 figurami. — Cena kompletu Rs. **18**; w ozdobnej oprawie Rs. **22.**

Także do nabycia (tak długo jak zapas starczy)

w 30-tu zeszytach po kopiejek **60.**

Autorowi dzieła *przyznano* na wystawie w Tryeście w r. 1882 **złoty medal** w dziale sztuk i nauk.

HISTORYĘ POWSZECHNĄ

BECKERA,

w przekładzie dopełnionym i uzupełnionym

w epoce dziejów najnowszych,

pod redakcyą **M. Wołowskiego,** w 12 tomach po Rs. **1** kop. **10** za tom (oprawne tomy zawierające po 2 tomy po Rs. **2** kop. **50**) lub w zeszytach po kop. **10.**

GEOGRAFJĘ POPULARNĄ

czyli

Ziemia w malowniczych obrazach.

Opisy najciekawszych krajów, ludów i miejscowości według najnowszych źródeł i najcelniejszych autorów, opracował

Dr. Wł. Wicherkiewicz,

z mapkami i drzeworytami, w 53-ch zeszytach po kop **15.**

Podręczniki do nauki języków obcych

(Z WYMOWĄ)

podług metody **D-ra H. Loewego.**

JĘZYK FRANCUZKI

ze słownikiem

francuzko-polskim i polsko-francuzkim,

komplet w 25 zeszytach

po 15 kop.

JĘZYK NIEMIECKI

ze słownikiem

polsko-niemieckim i niemiecko-polskim,

komplet w 25 zeszytach

po 15 kop.

Roznosiciele mają Prospekty i Zeszyty na okaz!

Roznosiciele mają Prospekty i Zeszyty na okaz!

Дозволено Цензурою, Варшава 21 Апрѣля 1889 г.

Druk Jana Cotty w Warszawie, Senatorska 29.

Cena 20 kop.

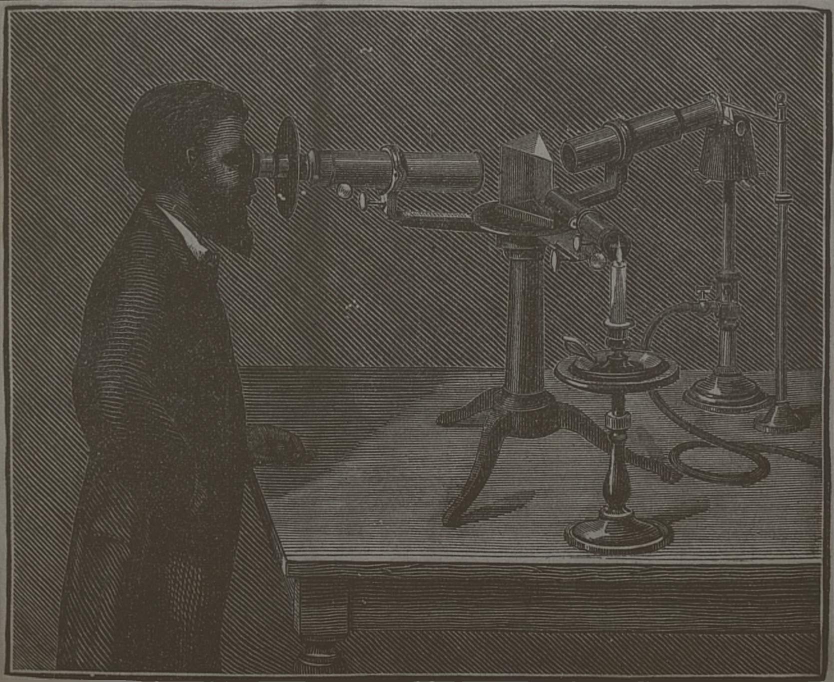
Zeszyt 17.

Cena 20 kop.

SIŁY PRZYRODY.

POPULARNY WYKŁAD FIZYKI

I GŁÓWNIEJSZYCH JEJ ZASTOSOWAŃ.



Spektroskop.

Podług dzieła A. Guillemin'a „Le monde physique"

OPRACOWALI

Józefowa Nusbaum

bak. n. prz.

i

Henryk Silberstein

dr. fil., b. as. chem. przy un. w Bernie.

WARSZAWA.

Nakładem Księgarni **H. Olawskiego**, ul. Mazowiecka № 6.

1889.



w Lit. „Zofija" B. A. Bukaty Królewska.

III. Zjawiska interferencyi światła.

Barwy cienkich warstw przezroczystego ciała.
Bańka mydlana.

się jako ciemne na jasnem tle? Następujące doświadczenia mogą nam dać pewne wskazówki co do przyczyn tej, że tak powiemy, odwracalności widm: Rzućmy najprzód na ekran widmo lampy elektrycznej, które, jak wiemy, jest *ciągłe*, następnie wprowadźmy w zagłębienie dolnego jej węgla kawałek sodu, przyczem ten się ulatnia, rozżarza i otacza żółtą płomienistą powłoką biało świecący węgiel górny. Wtedy to na ekranie, w ciągłem przed chwilą widmie, *pojawia się obecnie linia ciemna*, zajmująca tutaj dokładnie to samo położenie, co ciemna linia *D* w widmie słonecznem. Linia ta zniknie zaś natychmiast, gdy przesuniemy górny węgiel tak, ażeby tylko czyste jego światło, nie przechodzące przez rozżarzone pary sodu, padało na pryzmat. Doświadczenie to pokazuje, że rozżarzone pary sodu przepuszczają wszystkie promienie światła elektrycznego, z wyjątkiem tych, jakie same wysyłają; te ostatnie zostają pochłonięte czyli *zabsorbowane*. W taki sam jak powyższy sposób można także otrzymać ciemne t. zw. *linie absorbcyjne* innych ciał. Umieściwszy np. na dolnym węglu lampy elektrycznej jakąś sól litynową razem z kawałkiem sodu, otrzymamy w widmie światła lampy dwie ciemne linie: jedną—od sodu, zajmującą to samo miejsce co w poprzedniem doświadczeniu, drugą zaś—od litynu, pojawiającą się w czerwieni, tam, gdzie zwykle wypada jasna linia litynowa. A więc i pary litynu pochłaniają te promienie, jakie same są zdolne wysyłać. To, cośmy tutaj powiedzieli o parach sodu i litynu, stosuje się także do innych ciał i odnośne fakty możemy ująć w ogólne prawo, które brzmi: *gazy lub pary pochłaniają te rodzaje promieni, jakie same, będąc w stanie rozżarzenia, wysyłają, przepuszczają zaś wszystkie inne.* Do ugruntowania i rozwoju ważnego tego prawa przyczynili się różni znakomici uczeni, jak Stokes, Foucault, Angström, Balfour Stewart, Kirchhoff. Stanowi ono, że tak powiemy, główny filar, na którym opiera się optyczna metoda badania ciał za pomocą ich widm, czyli metoda *analizy spektralnej*.

Balfour Stewart, a zwłaszcza Kirchhoff, nadali prawu temu formę nadzwyczaj ścisłą i rozległą. Pierwszy z nich pokazał najprzód, odnośnie do ciepła, że *zdolność pochłaniająca (absorb-*

cyjna) danego ciała, przy określonej temperaturze, jest równa jego zdolności wysyłającej (emissyjnej) dla każdego rodzaju promieni cieplnych. Dalej poddawał on doświadczeniu kawałek specyalnego fajansu, który rozpatrywany przy dziennem świetle, przedstawiał części bardziej ciemne od innych: pierwsze pochłaniały więcej z padającego na fajans światła, niż ostatnie. Otóż gdy fajans ten jest doprowadzony, przez dostatecznie silne ogrzanie, do stanu świecenia, wtedy—w razie jeżeli dopiero co przytoczone twierdzenie Stewarta o promieniach cieplnych, stosuje się także do świetlnych—owe *ciemniejsze* poprzednio części powinny okazać się *jaśniejsze* od pozostałych. Albowiem w pierwszym wypadku fajans był oświecony i różne jego części słabiej lub silniej pochłaniały światło, w drugim zaś razie jest on świecącym; te same więc części powinny odpowiednio wysyłać mniej lub więcej światła. Doświadczenie w zupełności potwierdziło ten wniosek. Stewart badał także barwne szkło zimne oraz ogrzane do wysokiej temperatury. W stanie zimnym pochłania ono część przechodzącego przez nie światła, część zaś przepuszcza, lecz samo żadnych promieni nie wysyła. Przeciwnie szkło to, ogrzane do temperatury rozżarzonego węgla, wysyła pewne promienie i to te właśnie, które może pochłaniać; inaczej mówiąc, dopełnia przez emissyę to, co zabsorbowało. Badania te dowodzą, że powyższe twierdzenie w zupełności stosuje się także do promieni świetlnych.

Kirchhoff również wykonał bardzo wiele doświadczeń, dotyczących stosunku pomiędzy pochłanianiem i wysyłaniem światła. Z doświadczeń tych zatrzymamy się tylko na jednem, dla nas obecnie najważniejszem. Zauważył on mianowicie, iż w widmie słonecznem niema ciemnej linii, odpowiadającej jasnej czerwonej linii w widmie litynu, spróbował tedy wytworzyć w pierwszem ową ciemną linię: W tym celu przepuszczał światło słoneczne przez słaby płomień gazowy, zabarwiony na czerwono za pomocą par litynu. Te ostatnie odejmowały światłu słonecznemu odnośne czerwone promienie, przez co w widmie słonecznem pojawiła się nowa ciemna linia. Gdy stopniowo zmniejszał natężenie światła słonecznego, ciemna ta linia również zanikała stopniowo, aż

nie można już jej było odróżnić od reszty widma; wreszcie przy bardzo znacznem osłabieniu rzeczonego światła, na miejscu jej wystąpiła jasna linia litynowa na ciemniejszem tle. Zmieniając więc natężenie światła słonecznego, można w danym punkcie jego widma otrzymać linię ciemną na jasnem tle, albo widmo o wszędzie jednakowem natężeniu światła, albo nareszcie linię jasną na ciemnem tle. Kirchhoff używając do podobnych doświadczeń ziemskiego źródła światła, pokazał także, że ciemne linie absorbcyjne pojawiają się tylko w razie, gdy *płomień pochłaniający posiada niższą temperaturę, niż owo źródło*, wtedy bowiem jedynie światło, wysyłane przez płomień, nie może skompensować straty, jaka powstaje wskutek pochłaniania. Gdy zaś płomień jest o tyle gorący, że wysyła więcej światła, aniżeli pochłania, wtedy w odnośnem widmie widzimy jasne linie na ciemnem tle. Wreszcie gdy płomień wysyła tyleż światła, ile go pochłania, widmo źródła jest ciągłe i niczem nie zdradza obecności pochłaniającego płomienia. Rezultaty te doświadczeń, jak zaraz zobaczymy, są niezmiernie ważne dla analizy spektralnej, szczególniej w zastosowaniu jej do ciał niebieskich ([1]), pozwalają one bowiem dokładnie objśniać ciemne linie Fraunhofer'a, a także poznać skład słońca i innych gwiazd.

Słońce przedstawia olbrzymią massę o niezmiernie wysokiej temperaturze; powierzchnia jego, zwana *fotosferą*, rozżarzona do białości, wysyła białe światło, które samo przez się dałoby widmo ciągłe. Wokoło słońca jednak, po nad fotosferą, znajduje się powłoka z rozżarzonych gazów i par, zwana *chromosferą*. Ta ostatnia *posiada temperaturę niższą*, niż fotosfera, wystarczającą jednak do utrzymania ciężkich nawet metali w stanie lotnym. Światło fotosfery słonecznej, zanim dochodzi do nas, musi tedy przejść przez chromosferę, gdzie ulega pochłaniającemu działaniu rozmaitych par, wskutek czego w odpowiednich miejscach widma słonecznego powstają ciemne linie—są to właśnie linie Fraunhofer'a.

([1]) Tait, Progrès récents de la physique.

Z faktów podanych wyżej (patrz str. 512) wynika już, że atmosfera słoneczna zawiera wodór, sód i żelazo. Dalsze badania wykazały, że dwie ciemne linie *H* pochodzą od par wapnia, grupa zaś linii *b* (patrz tablicę № 1)—od par magnezu; linię *G*, częściowo także grupę *E*, przypisać należy żelazu. Analiza spektralna wykazała następnie, że na słońcu, oprócz powyższych, istnieją jeszcze z pewnością następujące pierwiastki: bar, chrom, nikiel, miedź, cynk, stront, kadm, kobalt, mangan, glin, tytan. Wreszcie w widmie słonecznem znajduje się pewna ilość ciemnych linii, nie odpowiadających żadnemu ze znanych dotychczas ziemskich pierwiastków, od jakich zaś ciał zależą one, przyszłość to może wykaże.

Musimy jeszcze nadmienić, że w widmie słonecznem, oprócz takich linii Fraunhofer'a, które bezsprzecznie pochodzą od pochłaniającego działania chromosfery, istnieją jeszcze liczne inne, powstałe wskutek pochłaniania niektórych promieni przez atmosferę ziemską i zwane liniami *tellurycznemi.* Ich pochodzenie ziemsko-atmosferyczne łatwo poznajemy po tem, że stają się one wyraźniejsze, albo nawet w ogóle występują dopiero wtedy, gdy promienie jego przechodzą przez najgrubszą warstwę atmosfery ziemskiej. Jako linie Fraunhofer'a telluryczne można np. wymienić linie *A* i *B*, ciemność których zależy ściśle od położenia słońca na niebie. Gwiazdy stałe dają widma podobne wprawdzie do słonecznego, lecz niezupełnie z niem zgodne. Ważnym jest fakt, że nie wszystkie ciemne linie w widmach tych gwiazd odpowiadają takimże liniom w widmie słonecznem (porównaj w tablicy № 1 i 2), co dowodzi, że pewna dosyć znaczna ilość tych ostatnich nie pochodzi ani od atmosfery ziemskiej, ani od jakiego innego środka, znajdującego się ewentualnie w przestworach pomiędzy nami, a ciałami niebieskiemi, lecz że istotnie linie te powstają wskutek pochłaniającego wpływu atmosfery słonecznej (chromosfery). Przytoczymy wreszcie jeden jeszcze rezultat odnośnych poszukiwań, stanowiący nader piękne potwierdzenie opisanej przez nas wyżej teoryi powstawania ciemnych linii w widmach. Oto badano, za pomocą analizy spektralnej, tak zwane *wyskoki słoneczne* (protuberancye), widoczne podczas cał-

kowitych zaćmień słońca, w różnych miejscach jego obwodu, pod postacią czerwonawych występów. Są to prawdopodobnie wybuchy gazów, *wyrzuconych na olbrzymią wysokość po nad atmosferę słoneczną;* przy niezaćmionem słońcu nie są one widoczne dlatego, że słabe ich światło znika w obec wielkiej jasności zwykłego światła dziennego. Otóż podczas zaćmienia słonecznego w r. 1868 udało się po raz pierwszy otrzymać widmo protuberancyj: składa się ono z *samych jasnych linii,* z których najważniejszemi są: trzy linie wodoru, oraz jedna, nie odpowiadająca żadnemu z dotychczas znanych ziemskich pierwiastków. Janssen, wysłany przez francuzką Akademię do Indyj Wschodnich w celu obserwowania owego zaćmienia, odkrył zaraz metodę, pozwalającą dostrzedz jasne linie wyskoków nawet przy niezaćmionem świetle słonecznem. Zasadę tej metody wygłosił jeszcze przed nim Lockyer, który nie wiedząc nic o odkryciach francuzkiego fizyka, wprowadził ją nawet w wykonanie. Polega ona głównie na tem, że zmniejsza się natężenie jasności atmosfery ziemskiej, oświeconej przez słońce, nie osłabiając przytem prawie wcale światła wyskoków. Sam przyrząd, używany do tego celu, pozwala nietylko widzieć widmo wyskoków, lecz także kształt ich i kontury. Mają one postać zakrzywionych rogów, chmur lub łańcuchów górzystych; jedne składają się przeważnie z wodoru, drugie zawierają pary żelaza, magnezu, wapnia i innych pierwiastków, w ogóle zaś przedstawiają ten sam skład chemiczny, co i chromosfera. Ponieważ sięgają po nad tę ostatnią, przeto światło ich, przybywające do nas, nie ulega pochłaniającemu jej działaniu i dlatego też daje jasne linie tam, gdzie w widmie słonecznem znajdują się ciemne.

Za pomocą powyższej metody, zastosowanej do badania widmowego wyskoków, rozpatrywano także i samą chromosferę, w widmie której Young odkrył 273 jasnych linii, z tych 64 należących do żelaza.

W obec tych rezultatów bez przesady można powiedzieć, że analiża spektralna stanowi jeden z najwspanialszych tryumfów nauki, umożliwiła bowiem poznanie fizycznej i chemicznej budowy ciał, nieskończenie od nas dalekich. Zastosowana do ba-

dania gwiazd stałych, planet, komet, mgławic, dała cenny materyał do tego poznania i rozwiązała zagadnienia, które na innej drodze zaledwie dałyby się rozstrzygnąć.

§ 2. Analiza spektralna ciał ziemskich. Spektroskop.

W poprzednim § wyłożyliśmy najważniejsze zasady analizy spektralnej i przedstawiliśmy rezultaty zastosowania jej do ciał niebieskich, obecnie zaś rozpatrzymy znaczenie tej metody dla chemicznego badania ciał, znajdujących się na ziemi. Od dawna wiedziano o tem, że pewne substancye, wprowadzone do płomienia, zabarwiają go na kolor sobie właściwy, uciekano się nawet do tego sposobu, ażeby w danym razie wykazać ich obecność; sposób ten wszakże sam w sobie był bardzo niepewnym, a stał się środkiem do ścisłej analizy dopiero wtedy, gdy poznano, jakie usługi może tutaj oddać pryzmat. Gołe oko nie może np. dostrzedz różnicy między czerwonem zabarwieniem płomienia przez lityn i przez stront; gdy natomiast światło takiego płomienia przepuścimy przez pryzmat, otrzymamy od dwóch tych ciał odmienne widma. Wprowadziwszy do płomienia jakąś sól sodową, zawierającą ślady litynu, otrzymamy zabarwienie, które wyda nam się czysto żółtem, pryzmat zaś wskaże, że jest ono także czerwonem, w widmie bowiem tego płomienia pojawi się, obok linii żółtej, także czerwona. Miejsce, jakie dana jasna linia w widmie zajmuje, nie zależy od temperatury źródła światła, inaczej mówiąc, czy badane ciało wprowadzimy do płomienia t. zw. lampki gazowej Bunsena, czy też do źródła o wiele gorętszego, jasne linie ciała tego pojawią się zawsze w jednem i tem samem ściśle określonem miejscu widma. Od temperatury zależną jest tylko, jak wiemy, *jasność* linii, wzrastająca w miarę podnoszenia się pierwszej. Niekiedy też przy wyższej temperaturze występują wyraźnie nowe jasne linie, które przedtem były niewidoczne z powodu zbyt słabego natężenia; tak np. w płomieniu lampy elektrycznej lityn daje, oprócz znanej nam czerwonej, linię błękitną, niewidoczną przy użyciu lampki Bunsena.

Analiza spektralna umożliwiła rozległe badania nad składem różnych połączeń; przytem metoda ta odznacza się nadzwyczajną czułością; dość powiedzieć, że jedna trzymilionowa część miligrama sodu może jeszcze wywołać żółte zabarwienie światła i dać odnośną jasną widmową linię; tak minimalnej zaś ilości niepodobna wykryć za pomocą żadnej innej metody. Dowiedziono np., że powietrze, a szczególniej zawieszone w niem pyłki, zmięszane są z chlorkiem sodu, którego drobniutkie cząstki unoszą się z wody morskiej, spienionej i wzburzonej przez wichry. Dość jest uderzyć o stół, a oderwane odeń pyłki natychmiast zabarwiają znajdujący się w blizkości płomień na żółto. Niezmierna czułość omawianej tu metody pozwoliła Bunsen'owi i Kirchhof'owi odkryć dwa nieznane przedtem pierwiastki z grupy metali alkalicznych (potasowców), a mianowicie *cez* i *rubid*, połączenia których w ilości nader małej znajdują się w pewnych minerałach i źródłach mineralnych. Widma ich przedstawione są na tablicy pod № 5 i 6. Następnie Crookes odkrył, za pomocą analizy spektralnej, metal *tal*, podobny do ołowiu, Reich i Richter znaleźli, drogą tej samej metody, metal *ind*, zawarty w niektórych rudach cynkowych, zaś Lecoq-de-Boibaudran—pierwiastek *gal*.

Do widmowego badania t. zw. lekkich metali wystarcza płomień lampki Bunsena; źródło takie jest jednak za słabe, gdy chodzi o otrzymanie w stanie rozżarzonej pary metali ciężkich, jak np. cynk, miedź, srebro i t. p. W tych razach należy uciec się do potężniejszego źródła ciepła. Jeżeli widmo ciężkiego metalu ma być rzucone na ekran, wtedy zwykle używa się do tego lampy elektrycznej, dla subjektywnego zaś jego badania za pomocą przyrządu, który wkrótce opiszemy, dostateczne są zwyczajne iskry elektryczne, albo też iskry silnej maszyny indukcyjnej (poznamy ją w księdze o elektryczności), przebiegającej pomiędzy dwoma biegunami, utworzonemi z badanego metalu, przyczem cząstki tego ostatniego zostają ulotnione i rozżarzone. Widma metali ciężkich przedstawiają bardzo znaczną ilość jasnych delikatnych linii o skomplikowanem w ogóle ugrupowaniu. Ażeby rozżarzyć ciało gazowe, przepuszcza się iskry z aparatu

indukcyjnego przez szklaną rurę, zawierającą dany gaz w stanie rozrzedzonym; wtedy poczyna on świecić barwą, zależną od jego natury i to właśnie światło poddaje się badaniu widmowemu. Plücker, Hittorf i Wüllner dowiedli, że przy podobnej metodzie, jeden i ten sam gaz może dawać różne widma, jeżeli zmienia się odpowiednio jego ciśnienie oraz rodzaj elektrycznego wyładowania. Wodór np. pod powiększonem ciśnieniem i przy silnem elektrycznem wyładowaniu daje widmo ciągłe, a więc wysyła

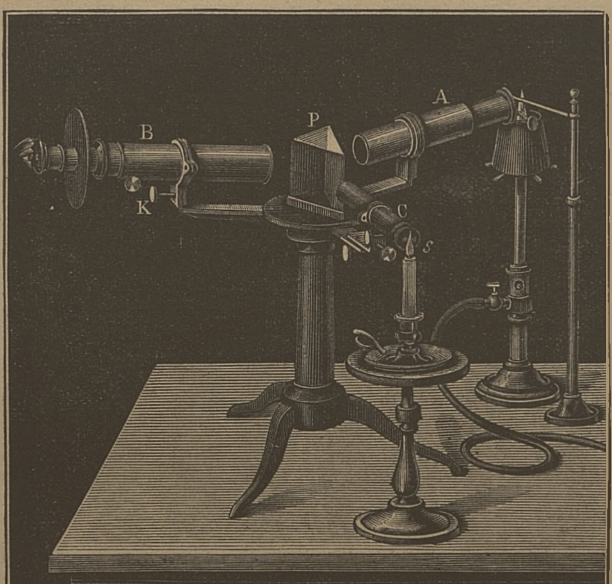


Fig. 345. Spektroskop.

promienie wszelkiej łamliwości; ma to jednak miejsce, jak widzimy, tylko przy szczególnych warunkach.

Pozostaje nam jeszcze opisać przyrząd, ułatwiający badanie oraz porównywanie widm rozmaitych źródeł światła, znany pod nazwą *spektroskopu.* Przedstawiony on jest w całości na fig. 345. Składa się z pionowo ustawionego pryzmatu *P*, wokoło którego umieszczone są w różnych kierunkach trzy lunety *A*, *B* i *C*. Z tych pierwsza posiada na tylnym końcu, zwróconym do źródła światła mającego być badanem, wązką pionową szczelinę, która

wypada w ognisku głównem soczewki zbierającej, umieszczonej na drugim końcu tejże lunety. W ten sposób promienie świetlne, które przeszły przez szczelinę, padają jako równoległe na pryzmat, ten zaś rozszczepia je i zwraca w kierunku drugiej lunety *B*. Przez tę ostatnią obserwuje się widmo; ponieważ obraca się ona w płaszczyznie poziomej, wokoło pionowej osi, przechodzącej przez pryzmat, można ją przeto dowolnie skierowywać na różne części obrazu widmowego; guzik *K* służy do dokładniejszego jej ustawienia. Przy badaniach spektroskopicznych nadzwyczaj ważnem jest—jak zresztą czytelnik sam mógł się przekonać—oryentowanie się co do położenia w widmie pewnych jasnych i ciemnych linii. Umożliwia to właśnie trzecia luneta *C*: na tym jej końcu, który jest odwrócony od pryzmatu, znajduje się w *s* mała fotografowana skala o bardzo drobnych przezroczystych podziałkach, na drugim zaś umieszczona jest w odległości ogniskowej od skali soczewka zbierająca. Skalę tę oświeca się lampą lub świecą, której promienie, po wyjściu z lunety *C*, biegną równolegle do jej osi, poczem padają na przednią powierzchnię odpowiednio ustawionego pryzmatu tak, że odbijając się odeń, wpadają do lunety *B*. Dzięki takiemu urządzeniu, przez lunetę *B* widzi się jednocześnie powiększony obraz skali i badane widmo; w ten sposób można odnosić jasne lub ciemne linie tego ostatniego do właściwych miejsc na skali. Opisany spektroskop nie pozwala rozpatrywać badanego źródła światła w kierunku prostej linii, wskutek bowiem odchylania promieni przez pryzmat, luneta *A* musi także stanowić pewien kąt z lunetą *B*. Od niedogodności tej są wolne t. zw. *spektroskopy prostolinijne* (à vision directe), w których zamiast pojedyńczego pryzmatu znajduje się układ pryzmatyczny bez odchylenia (patrz str. 507). Do bardzo ścisłych badań nad widmem różnych metali oraz słońca, opisanych w poprzednim §, spektroskop o jednym pryzmacie

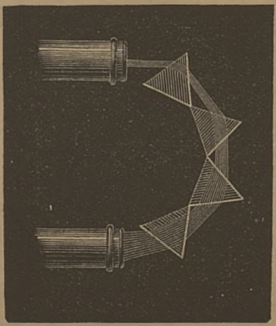


Fig. 346. Spektroskop o czterech pryzmatach, użyty przez Kirchhoffa.

nie wystarcza, a to z powodu zbyt słabej jego zdolności rozszczepiającej. Kirchhoff, chcąc wykonać dokładny rysunek tych widm, użył do tego silnie rozszczepiającego spektroskopu o czterech pryzmatach, odpowiednio umieszczonych jeden za drugim (fig. 346, str. 521) i zaopatrzonego w bardzo znacznie powiększającą lunetę. Tak zmodyfikowany przyrząd uwidocznił nowe linie, grupy zaś ich, przedstawiające się w słabszych spektroskopach jako prążki o niewyraźnych brzegach, rozpadły się na oddzielne delikatne linie, jak to np. ma miejsce ze znaną nam już podwójną linią Fraunhofera *D*. Spektroskop ten umożliwił także wykonanie doskonałych rysunków widma słonecznego (Kirchhoff, Hofman, Angström, Thalen), które mają również doniosłe znaczenie dla analizy spektralnej słońca i innych ciał niebieskich, co astronomiczne karty dla badań gwiaździstego nieba.

ROZDZIAŁ VIII.

Pochłanianie światła.

§ 1. Barwy ciał.

Czytelnik przypomina sobie, że w widmie słonecznem, oprócz ciemnych linii, pochodzących od pochłaniającego działania rozżarzonych par chromosfery, istnieją jeszcze takie, które tworzą się wskutek absorbcyi pewnych promieni przez atmosferę ziemską, a głównie przez zawarte w tej ostatniej pary wodne. Fakt ten dowodzi, że ciała lotne mogą powodować ciemne linie absorbcyjne nietylko wtedy, gdy są w stanie rozżarzonym, lecz także przy innych znacznie niższych temperaturach. Że tak jest w istocie, pokazują również liczne doświadczenia, z których przytoczymy tutaj kilka. Przez odpowiednią szklaną rurkę, zawierającą pary *jodu* o pięknej fioletowej barwie, przepuszcza się światło elektryczne, które następnie, rozszczepione w pryzmacie, tworzy na ekranie widmo. To ostatnie nie jest wtedy ciągłe, lecz przedstawia znaczną ilość ciemnych linii, w niektórych miej-

scach bardzo gęsto skupionych (patrz tablicę widmo № 11); pochodzą one oczywiście od pochłaniającego wpływu jodu i odpowiadają dokładnie jasnym liniom w widmie rozżarzonej pary tego pierwiastku. Dlatego właśnie, że jod w stanie pary pochłania promienie pomarańczowe, żółte i zielone, przepuszcza zaś czerwone i fioletowe, wydaje się on barwy mieszanej, przedstawiającej się dla oka jako fioletowa. W podobny sposób barwy innych przezroczystych ciał, tak stałych jak i ciekłych, znajdują objaśnienie swe w najrozmaitszej ich zdolności pochłaniania pewnych promieni światła. Jeżeli na drodze promieni slonecznych, lub w ogóle białych, umieścimy odpowiednio rozcieńczony wodny roztwór krwi, wtedy w odnośnem widmie znika fiolet, w częściach zaś żółtej i zielonej, pomiędzy liniami *D* i *E*, pojawiają się dwie szerokie ciemne smugi. Barwa krwi nie jest jednorodna, lecz składa się z wszystkich tych promieni białego światła, które przechodzą przez krew, nie uległszy pochłonięciu. Nieznaczna nawet chemiczna zmiana krwi powoduje odpowiednią zmianę w jej widmie, z czego korzysta fizyologia oraz medycyna sądowa. W wypadkach np. otrucia tlenkiem węgla lub kwasem pruskim, zmienione widmo krwi daje niezawodne wskazówki; chcąc je zbadać, należy tylko wodny roztwór krwi, przypuszczalnie zatrutej, wprowadzić do szklanego naczynia o ścianach równoległych i naczynie to umieścić przed szczeliną spektroskopu.

Wiadomo, że zielona barwa roślin zależy od t. zw. *chlorofilu*, zawartego w ich komórkach. Otóż spektroskopiczne badanie roztworu alkoholowego tego barwnika pokazuje, że pochłania on bardzo silnie część promieni czerwonych oraz słabiej niektóre promienie pomarańczowe, żółte i zielone, dla niebieskich zaś i fioletowych jest prawie zupełnie nieprzezroczysty. Zielona barwa chlorofilu jest tedy mieszaniną tych wszystkich promieni z białego światła, które on swobodnie przepuszcza. Pochłanianie światła zależy także od grubości warstwy lub stopnia koncentracyi substancyi, przez którą ono w danym razie przechodzi: gdy jedna albo druga wzrastają, linie absorbcyjne tejże substancyi stają się szersze oraz ciemniejsze, albowiem coraz to nowe

promienie ulegają pochłonięciu. To nam objaśnia, dlaczego jedno i to samo ciało, zależnie od swej grubości, może przedstawiać różne barwy. Tak np. woda, która w małych ilościach jest bezbarwna, przy znacznej grubości może wydać się niebieską; szkło z przymieszką tlenku kobaltu posiada barwę ciemnoniebieską lub niebiesko-białą, zależnie od tego, czy mamy przed sobą bardzo grubą, albo też cienką jego warstwę. Podobnie i ciałka krwi, badane oddzielnie pod mikroskopem, mają barwę nader słabo czerwoną, w większej zaś masie nadają krwi mocno czerwony kolor. Odpowiednio gruba warstwa roztworu chlorofilu przepuszcza tylko ciemno-czerwone promienie i taką też barwę przedstawia on w tych warunkach.

Jeżeli widmo słoneczne lub elektryczne rzucimy na biały papierowy ekran, przekonamy się, że wszystkie barwy rysują się na nim z jednakową wyrazistością; przeciwnie gdy to samo widmo otrzymamy np. na papierze czerwonym, wtedy barwy: żółta, zielona, niebieska i fioletowa znikną prawie zupełnie, czerwona zaś i pomarańczowa będą posiadały tę samą wyrazistość, co na ekranie białym. Dowodzi to, iż papier czerwony pochłania z padającego nań światła wszystkie promienie, oprócz czerwonych i pomarańczowych, które zostają przezeń nieprawidłowo odbite czyli rozproszone (patrz str. 447). Podobne doświadczenia, wykonywane z papierem żółtym, zielonym, niebieskim i t. d. pokazują, że każdy z nich pochłania inne części widma, a barwa jego, rozpatrywana przy dziennem świetle, stanowi zawsze mięszaninę wszystkich tych promieni, które w danym wypadku ulegają odbiciu. Papier biały odrzuca wszystkie promienie, wchodzące w skład białego światła, w jednakowym stopniu; to znaczy, że nie posiada on żadnej przeważnej zdolności pochłaniania tych lub owych promieni. Powierzchnia *szara* w jednakowym, nader słabym stopniu odbija promienie wszelkiej barwy, *czarna* zaś posiada tę właściwość, że pochłania wszystkie padające na nią promienie. Widzimy tedy, że barwy ciał, rozpatrywanych w świetle przechodzącem lub też odbitem, znajdują zawsze swe objaśnienie w zdolności pochłaniającej tychże ciał i że stanowią że tak powiemy, tę resztę światła, która nie została zabsorbowaną.

Jeżeli na białe ciało padają np. tylko promienie żółte, wtedy wydaje się ono zabarwionem na żółto; podobnie uważamy je za ciało czerwone, zielone lub niebieskie w razie, gdy oświecają je promienie jednej z tych barw. Ciało zaś czarne pozostaje takiem, niezależnie od barwy padającego nań światła. Wreszcie gdy ciało posiada jednę z barw widma słonecznego, np. czerwoną, wtedy będąc oświecone przez promienie czerwone albo białe, jaśnieje w pełnym blasku, przy oświeceniu zaś przez jakiekolwiek inne promienie, np. żółte, wydaje się czarnem. Doświadczenia te należy wykonywać w przyciemnionym pokoju, dla usunięcia wpływu dziennego światła. Rzecz oczywista, że każde ciało, badane w świetle przechodzącem lub odbitem, może przedstawiać tylko tę barwę, jaka jest zawarta w źródle oświecającem. Musimy wszakże zauważyć, że w większości wypadków, barwa ciał nie jest do tego stopnia wyłączną, ażeby wszystkie promienie, oprócz tych, które zgadzają się z nią, zostały absolutnie pochłonięte; zwykle ciało odrzuca jeszcze promienie innych barw, jakkolwiek nader słabo. Otóż jeżeli padają nań promienie jego własnej barwy, wtedy jest ono najbardziej widoczne, nie znika jednak w oświeceniu innej barwy, lecz przedstawia się tylko daleko mniej jasno. Dlatego też ciała w wypadkach, gdy są wystawione na działanie promieni, których barwa nie zgadza się z ich własną, nie są zupełnie czarne. Jednorodne oświecenie nie pozwala więc w ogóle rozróżniać świetności barw, a uświadamia nam tylko stopniowania w jasności. Gdyby, jak powiada Lomel, słońce stanowiło kulę z rozżarzonego sodu, cała ziemia nasza, wraz ze wszystkiemi znajdującemi się na niej tworami, miałaby jednostajny ponury wygląd. Białe światło słoneczne, zawierające nieskończoność barwnych odcieni, jest tym naturalnym czarodziejem, który przyobleka otaczające nas przedmioty w różnobarwne ich szaty. Światło świecy lub gazu oświetlającego zawiera te same promienie, co i słoneczne, lecz w innym nieco ilościowym stosunku: w pierwszem znajduje się bardzo wiele promieni żółtych, a także zielonych, daleko zaś mniej niebieskich i fioletowych, aniżeli w drugiem. To nam tłómaczy, dlaczego przy świecy trudno jest odróżnić materyę zieloną od

niebieskiej. Ciała bowiem zielone odbijają przeważnie promienie zielone i niektóre niebieskie; przeciwnie ciała niebieskie odbijają szczególniej promienie tejże barwy, a także nieco zielonych. Ponieważ tedy światło świecy zawiera mało niebieskich i dużo zielonych promieni, to materye o dwóch tych barwach, oświecone przez nią, muszą wydawać się zielonemi.

W końcu dodamy jeszcze, że barwy ciał bardzo rzadko zgadzają się z odpowiedniemi barwami widma słonecznego, albowiem pierwsze są, jak wiemy z powyższego, złożone z kilku różnych odcieni i ulegają dalszemu rozszczepieniu. Należy tylko patrzyć przez pryzmat na jakikolwiek barwny przedmiot, np. na kwiatek lub kawałek materyi, ażeby przekonać się, że brzegi obrazu, równoległe do krawędzi pryzmatu, przedstawiają grę barw widmowych.

§ 2. Fluorescencya. Fosforescencya.

Rozpatrzmy obecnie wpływ, jaki absorbowane promienie wywierają na samo ciało pochłaniające. W tym celu rzućmy wiązkę białego światła najprzód na soczewkę zbierającą, a następnie na szklane naczynie (fig. 347), zawierające np. bezbarwny wodny roztwór eskuliny — substancyi, znajdującej się w korze kasztana. Niechaj odległość naczynia od soczewki będzie nieco mniejsza, niż jej odległość ogniskowa. Promienie, po wyjściu z soczewki, tworzą stożek, część którego wypada wewnątrz roztworu; otóż ta właśnie jego część poczyna łagodnie, lecz wyraźnie świecić piękną niebieską barwą, co wskazuje, że cząstki eskuliny, znajdujące się na drodze przechodzących promieni, stają się samodzielnem źródłem światła. To ostatnie jest najsilniejsze tuż przy ścianie naczynia, głębiej zaś traci szybko na intensywności.

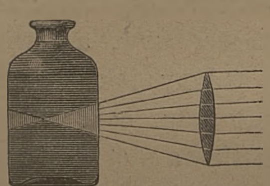


Fig. 347. Zjawisko fluorescencyi.

Znaczna ilość ciał przezroczystych—stałych i ciekłych, posiada podobną zdolność świecenia pod wpływem zewnętrznych

promieni. Zjawisko to nosi nazwę *fluorescencyi*, zostało bowiem po raz pierwszy zauważone u pewnej odmiany fluspatu (fluorek wapnia), która, będąc sama przez się zieloną, w pewnych warunkach poczyna świecić niebiesko-fioletową barwą. Zdolność fluoryzowania w wysokim bardzo stopniu posiadają także, między innemi, następujące ciała: szkło zabarwione na żółto przez uran i w ogóle związki uranowe, roztwór siarczanu chininy, alkoholowy roztwór chlorofilu, nafta i t. d.; siatkówka oka w świeżym stanie przedstawia także słabą fluorescencyę (Helmholtz, Sieczenow). Metale zaś, również jak i węgiel, kwarc i t. p. są pod omawianym tutaj względem zupełnie nieczynne. Zauważymy jeszcze, że światło, wysyłane wskutek fluorescencyi, jest zawsze zabarwione, barwa zaś jego zależy od substancyi, przez którą w danym razie przechodzą promienie; jest ona niebieską dla siarczanu chininy, jasno-zieloną dla szkła uranowego, czerwoną dla chlorofilu, niebieską dla nafty i t. d. Zmodyfikujmy obecnie powyższe doświadczenie w taki sposób, ażeby owa wiązka białego światła, zanim jeszcze dosięgnie soczewki, przeszła przez naczynie o ścianach równoległych i zawierające taki sam zupełnie roztwór eskuliny, jak to, które znajdujo się po za soczewką. Światło, wychodzące z tej ostatniej pod postacią stożka zdaje się być niezmienione, z zachowania się jego po wejściu do drugiego roztworu eskuliny przekonywamy się jednak, iż nie posiada ono już więcej zdolności wywołania w nim fluorescencyi. Inaczej mówiąc, światło, które raz już przeszło przez roztwór eskuliny (to samo stosuje się do innych ciał fluoryzujących), traci wskutek absorbcyi te promienie, które mogą wywołać fluorescencyę takiegoż roztworu. Podobne doświadczenia, wykonane z innemi fluoryzującemi ciałami, dały rezultaty zupełnie analogiczne, które w ogóle można wyrazić w następującej formie: *ciała, zdolne do fluorescencyi, zostają doprowadzone do stanu tego przez te promienie, które zostają przez nie pochłonięte.*

Fluorescencya danego ciała zależy więc od składu padającego nań światła tak, że nie wszystkie promienie mogą spowodować to zjawisko. Przekonano się, że ażeby to uczynić, muszą one w każdym razie posiadać łamliwość większą, albo przynaj-

mniej równą łamliwości tych promieni, które mają pojawić się dzięki fluorescencyi. Naprzykład siarczan chininy lub szkło uranowe, oświecone przez promienie czerwone, pomarańczowe albo żółte, nie fluoryzują wcale, albowiem światło fluorescencyjne, jakie ciała te są w stanie wydawać, składa się z promieni o łamliwości większej, niż wyżej wymienione. Przeciwnie chlorofil fluoryzuje w czerwonej barwie, niezależnie od rodzaju padających nań promieni. Odnośna metoda badania polega na tem, że rzuca się widmo słoneczne lub elektryczne na ścianę przezroczystego naczynia, zawierającego dane ciało i obserwuje, w którem mianowicie miejscu powstaje fluorescencya. Jeżeli np. mamy do czynienia z roztworem eskuliny, to przekonywamy się, że część widma, począwszy od czerwieni aż do ciemnego błękitu, nie wywiera nań żadnego wpływu; dopiero w blizkości ciemnej linii *G* pojawia się w roztworze owo niebieskie światło, ciągnące się nietylko wzdłuż całego fioletu widma, lecz widoczne jeszcze po za nim na odległości prawie równej długości widma, otrzymanego w zwykłych warunkach. Dowodzi to, że po za fioletowemi promieniami znajdują się jeszcze inne, bardziej od nich łamliwe, których okiem dostrzedz nie możemy; nazywamy je *ultra-fioletowemi*. Jeżeli na drodze tych ostatnich promieni umieszczamy substancyę fluoryzującą, jak np. w powyższym wypadku eskulinę, albo też siarczan chininy, ciała te poczynają fluoryzować we właściwej barwie, zdradzając przez to dla oka obecność promieni ultra-fioletowych. Gdy do doświadczeń tych używa się światła słonecznego, wtedy i w części ultra-fioletowej jego widma, rzuconego na substancyę fluoryzującą, można dostrzedz mnóztwo ciemnych linii, bezsprzecznie zależnych od słońca, albowiem nie pojawiają się one nigdzie w widmie np. elektrycznem, w słonecznem zaś występują zawsze, niezależnie od użytej substancyi fluoryzującej.

Promienie ultra-fioletowe można zresztą zobaczyć i bez udziału ciał fluoryzujących, należy tylko starannie zasłonić część widma, od linii *B* aż do *H*. Barwa ich przy słabszem świetlnem natężeniu jest ciemno-niebieska (błękitna), przy silniejszem zaś— niebiesko-szara; w zwyczajnych warunkach nie widzimy ich dla-

tego, że wywierają na oko wrażenie o wiele słabsze, niż mniej łamliwe promienie widma, zawarte między liniami *B* i *H*. W ogóle promienie o znacznej łamliwości, posiadające w wysokim stopniu zdolność wywoływania fluorescencyi, nie we wszystkich źródłach światła zawarte są w jednakowym stosunku. Szczególniej obfituje w nie światło, otrzymywane przy przepuszczaniu prądu elektrycznego przez szklaną t. zw. rurkę Geisslera, napełnioną np. rozrzedzonym azotem. W razie gdy wewnątrz znajduje się także pewna liczba kulek ze szkła uranowego, cała rurka, pod wpływem przebiegającego prądu, przedstawia wspaniałe zjawisko: azot świeci barwą czerwonawo-fioletową, kule zaś uranowe fluoryzują w pięknej jasno-zielonej barwie (patrz tablicę chromolitografowaną: „światło elektryczne w rozrzedzonych gazach", № 4). Zwykłe elektryczne światło również zawiera dużo promieni o wielkiej łamliwości, a nawet ultra-fioletowa część jego widma jest dłuższa, niż słonecznego; dlatego też światło to nadaje się tak dobrze do doświadczeń nad fluorescencyą. Przeciwnie płomień świecy lub gazowy okazuje się w tym wypadku prawie zupełnie nieczynnym dlatego, że jest ubogi w promienie rzeczonego rodzaju. Nie należy wszakże sądzić, że tylko najbardziej łamliwe promienie mogą wywołać zjawisko fluorescencyi. Tak np. widzieliśmy wyżej, że roztwór chlorofilu fluoryzuje już pod wpływem promieni czerwonych, począwszy od linii *B*; okazuje się nawet, że ze wszystkich części widma, środkowo-czerwone promienie, między liniami *B* i *C*, powodują w danym razie najżywszą fluorescencyę. Jako drugi przykład można podać alkoholowy roztwór pewnego barwnika anilinowego (Rose de Magdala). który przy dziennem nawet świetle silnie fluoryzuje w barwie pomarańczowo-żółtej; rzucając na naczynie, roztwór taki zawierające, widmo, przekonywamy się, że fluorescencya jego poczyna się już w czerwieni i że jest najsilniejsza w części zielono-żółtej. Najbardziej łamliwe promienie fioletowe i ultra-fioletowe z tego głównie względu zasługują tutaj na uwagę, że mogą wywołać fluorescencyę wszystkich tych znanych ciał, które w ogóle są zdolne do tego zjawiska.

Fluorescencya ciał trwa tak długo, dopóki działa zewnętrzne padające na nie światło; z chwilą usunięcia tego ostatniego, znika także samo zjawisko. Wyjątki od tego prawidła są tak nieliczne i małoznaczące, że możemy je pominąć. Lecz istnieje pewna grupa ciał, które, znajdując się przez pewien czas pod wpływem zewnętrznego źródła światła, świecą jeszcze po usunięciu tego ostatniego w ciemności. Do takich należą np. połączenia siarki z wapniem, strontem i barem, przedstawiające się pod postacią białych proszków. Zawarte w szklanych rurkach i umieszczone w ciemnym pokoju, ciała te nie okazują najmniejszego śladu świecenia, lecz gdy na kilka chociażby chwil oświecimy je białem światłem palącego się magnezu, które następnie oddalimy, owe białe proszki poczną świecić w ciemności, każdy inną barwą. Ciała te możemy także umieścić w rurkach Geissler'a, a następnie przepuszczać przez te ostatnie prąd elektryczny; po przerwaniu prądu zobaczymy, że owe ciała świecą w ciemnym pokoju (patrz przytoczoną wyżej tablicę № 2 i № 5). Zjawisko to nazywamy *fosforescencyą.* Do substancyj silnie fosforyzujących należą, oprócz wymienionych, dyament, spat wapienny, chlorofan (pewna odmiana fluspatu), jedwab, cukier oraz związki uranu. Z promieni widma, bardziej łamliwe posiadają w wysokim stopniu zdolność wywoływania fosforescencyi, przyczem przekonano się, że i w tym wypadku, podobnie jak przy fluorescencyi, czynią to właśnie te promienie, które przez daną substancyę zostają pochłonięte. Światło fosforencyjne, tak samo jak fluorescencyjne, składa się z promieni o mniejszej łamliwości, niż powodujące odnośne zjawisko światło zewnętrzne. Co zaś do promieni mniej łamliwych, zawartych pomiędzy liniami A i F, to na zasadzie pewnych faktów, odkrytych przez Becquerel'a, należy przypuścić, iż one nietylko nie są w stanie wywołać fosforescencyi, lecz zdają się nawet niweczyć wpływ bardziej łamliwych promieni. Jak widzimy, istnieje wielkie podobieństwo pomiędzy dwoma szeregami zjawisk, opisanemi w niniejszym §; właściwie mówiąc, *fosforescencya jest tylko fluorescencyą, trwającą dłużej, niż działanie zewnętrznego pobudzającego źródła.*

Becquerel przeprowadził bardzo rozległe doświadczenia nad fosforescencyą; posiłkując się wynalezionym przez siebie przyrządem, t. zw. fosforoskopem, odkrył on, że prawie wszystkie ciała są zdolne do fosforescencyi, wyjątek stanowią tylko metale. Podczas jednak gdy pewne substancye, jak np. wspomniane wyżej siarki wapnia, strontu i baru świecą fosforycznym blaskiem w ciągu wielu godzin, u innych natomiast ciał zjawisko to trwa bardzo krótko, jak np. u platyno-cyanku potasu, który świeci nie dłużej, jak $^1/_{500}$ sekundy.

Musimy jeszcze nadmienić o pewnej grupie objawów, mylnie zaliczanych do zjawisk fosforescencyi, a powstających wskutek zupełnie innej przyczyny. Mamy tu na myśli świecenie starego próchniejącego drzewa, niektórych istot żyjących, jako to: robaczka świętojańskiego, zieminka świecącego i wielu morskich zwierząt; do tych ostatnich należą meduzy, mięczaki, polipy, wymoczki, robaki obrączkowe i t. d., od nich też zależy świecenie morza. Większość świecących istot wydziela pewnego rodzaju śluz i ta to właśnie substancya wysyła promienie świetlne; u niektórych zaś istnieje specyalny organ, zawierający substancyę tłuszczową, która świeci. Zjawiskom tym towarzyszą prawdopodobnie jakieś procesy chemiczne; nowsze poszukiwania każą przypuszczać, że w wielkiej liczbie wypadków, świecenie zwierząt zależy od powolnego utleniania się tłuszczów, zawartych w ich tkankach.

§ 3. Chemiczne działanie promieni. Fotografia.

Wpływ promieni świetlnych nie ogranicza się na wywoływaniu w ciałach przejściowych tylko powyżej opisanych zmian. Istnieje mianowicie szereg ciał, na które światło działa tak energicznie, że powoduje łączenie się ich z innemi ciałami, albo też ich rozkład, to jest światło wywołuje także stałe zmiany chemicznych własności materyi. Jeżeli mięszaninę dwóch równych objętości gazów chloru i wodoru pozostawimy w ciemnym pokoju, gazy te nie połączą się wcale; gdy natomiast wystawimy ją na bezpośrednie działanie promieni słonecznych, połączenie nastąpi natychmiastowo i z wybuchem, przyczem utworzy się nowe ciało

lotne—chlorowodór, którego wodny roztwór znany jest jako kwas solny. Pod wpływem światła, chlor rozpuszczony w wodzie, rozkłada tę ciecz na jej składniki t. j. na wodór i tlen i łączy się z pierwszym; barwnikowe substancye roślinne, wystawione na działanie promieni słonecznych, ulegają odbarwieniu i na tem też polega bielenie materyj. Jednym z najważniejszych także przykładów chemicznego działania światła jest wpływ jego na sole srebra, jak na chlorek lub jodek srebra, które będąc oświecone, przybierają z początku barwę fioletową, następnie czarną, ulegając przytem rozkładowi i wydzielając srebro pod postacią nadzwyczaj subtelnego czarnego proszku; na tej własności soli srebra opartą jest sztuka fotograficzna, o której zaraz pomówimy. Musimy jeszcze nadmienić, że w wielu razach najsilniejsze chemiczne działania wywierają promienie najbardziej łamliwe, a mianowicie niebieskie, fioletowe i ultrafioletowe. Gdy np. w powyższem doświadczeniu z mieszaniną chloru i wodoru, umieścimy na drodze światła żółte szkło, przepuszczające tylko mniej łamliwe promienie, wybuch nie nastąpi, otrzymamy go zaś natychmiast, jeżeli szkło żółte zastąpimy niebieskiem. Doświadczenia pokazały również, że tylko bardziej łamliwe promienie wywierają chemiczny wpływ na owe sole srebra tak, że promienie te można nazwać *fotograficznemi*. Często także zowią je chemicznemi, przez to jednak mogłaby się nasunąć myśl, że tylko one posiadają własność chemicznego działania, odróżniającą je od innych promieni widma, co nie jest słusznem. Wspomniany wpływ ich naprzykład na sole srebra, którego nie posiadają mniej łamliwe promienie, polega na tem, że sole te pochłaniają właśnie promienie niebieskie, fioletowe i ultrafioletowe, przepuszczają zaś pozostałe. Przez dodanie do bromku srebra pewnych anilinowych barwników, udało się uczynić sól tę chemicznie, względnie fotograficznie, wrażliwą także na promienie czerwone, żółte i zielone. Wreszcie doświadczenia z różnobarwnem światłem wykazały, że mniej łamliwe promienie najskuteczniej wpływają na nader ważny proces chemiczny, odbywający się w zielonych częściach roślin i polegający na tem, że pochłonięty z powietrza kwas węglany (połączenie węgla

z tlenem) pod wpływem światła ulega tam rozkładowi, przyczem węgiel zostaje zasymilizowany, tlen zaś wraca do atmosfery.

Zwróćmy się obecnie do wspomnianego wyżej zastosowania chemicznego wpływu światła, do fotografii.

Czytelnik przypomina sobie, że na tylnej ściance (patrz fig. na str. 479) ciemni optycznej można otrzymać obrazy przedmiotów, umieszczonych przed tym przyrządem. Obrazy takie trwają jednak tylko dopóty, dopóki światło, wchodzące przez otwór do przyrządu, pada na tafelkę. Od czasu odkrycia ciemni optycznej, wielu badaczów usilnie się też starało wynaleźć sposób utrwalenia tych obrazów; nareszcie Nièpce i Daguerre zdołali zadanie to rozwiązać. Pierwszy z nich oddawał się cierpliwie poszukiwaniom, począwszy od roku 1814 do 1829; udało mu się otrzymać na miedzianej płycie, pokrytej srebrem, trwałe obrazy, nie zmieniające się już pod wpływem światła i dokładnie odpowiadające pod względem światłocieni samym przedmiotom. Substancyę, wrażliwą na działanie promieni świetlnych, stanowił pewien rodzaj smoły, rozpuszczonej w oleju lawendowym i jako cienka warstwa jednostajnie rozprowadzonej na owej płycie metalowej. Gdy płytę tak przygotowaną umieszczano w ciemni optycznej, po pewnym czasie pojawiały się na niej słabe kontury obrazu; chcąc je uczynić wyraźniejszemi, Nièpce zanurzał płyty w mieszaninę oleju lawendowego i nafty, przyczem zauważył, że te części smoły, które poprzednio wystawione były na działanie światła, pozostawały w mięszaninie prawie niezmienione, podczas gdy inne szybko się rozpuszczały, obnażając w odpowiednich miejscach powierzchnię metalową. Opisany tylko co sposób otrzymywania trwałych obrazów wymagał działania promieni w ciągu 10—12 godzin, nie mógł więc wcale być stosowany na szerszą nieco skalę. W r. 1829 Nièpce przedstawił rezultaty swych badań Daguerre'owi, który ze swej strony od dawna zajmował się tą samą kwestyą i wynalazł sposób zdejmowania obrazów, znany dopiero jednak od r. 1839 pod nazwą *daguerrotypii;* jakkolwiek obecnie sposób ten wyszedł zupełnie z użycia, zasługuje jednak na wzmiankę ze względów historycznych. Oto w krótkości zasady daguerrotypii. Płytę miedzianą, pokrytą srebrem, poddaje

się przez pewien czas działaniu par jodu, dopóki nie przyjmie ona odcienia złotawo-żółtego, to jest dopóki nie utworzy się na niej warstwa jodku srebra; przez to płyta staje się wrażliwą na światło, którą to wrażliwość jeszcze można spotęgować, wystawiając ją na działanie par bromu. Płytę tak przygotowaną umieszcza się w odpowiedniej ciemni optycznej, zaopatrzonej w objektyw o dwóch achromatycznych soczewkach, które mają mniejszą odległość ogniskową i pozwalają światłu szybcej działać, aniżeli objektyw pojedyńczy w zwykłej ciemni optycznej. Światło wywiera wtedy właściwy swój wpływ i na płycie tworzy się niedostrzegalny obraz oświeconego przedmiotu, umieszczonego przed soczewką. Przeciąg czasu, przez jaki światło w takich warunkach powinno działać, zależy od jego natężenia, od objektywu oraz od sposobu przygotowania płyty; waha się on pomiędzy 3 i 30 minutami. Po wyjęciu płyty—którą należy wtedy starannie ochraniać od dalszego wpływu światła—nie dostrzega się na niej najmniejszego śladu obrazu. Ten ostatni występuje wyraźnie dopiero wtedy, gdy poddaje się płytę działaniu par rtęciowych, osadzających się na tych jej częściach, które przedtem uległy wpływowi światła; tutaj tworzy się amalgamat srebra i rtęci, stanowiący jasne części obrazu, pozostałe zaś części, na których osadza się srebro w stanie nadzwyczaj rozdrobnionym, są ciemne. Klisza, w podobny sposób otrzymana, mogłaby bardzo szybko uledz starciu i dlatego należy ją utrwalić. W tym celu, po starannem obmyciu podsiarkonem sodu, poddaje się ją działaniu mięszaniny tegoż ciała i chlorku złota i ogrzewa z dołu za pomocą silnej lampy. Na całej powierzchni tworzy się wtedy cienka warstwa złota, która znacznie wzmacnia rysunek i w ogóle ochrania go od wszelkich przypadkowych zmian.

Daguerrotypia przedstawiała bardzo wiele złych stron. Po pierwsze klisze jej były dość ciężkie, co dawało się szczególnie uczuwać w podróży, a przytem były drogie; dokładne rozpatrzenie obrazu, z powodu odbijania się w nich światła, stanowiło pewną trudność tak, że należało im zawsze nadawać pewne określone położenie względem padających na nie promieni. Wreszcie otrzymywało się zwykle tylko jeden obraz, a gdy z tego samego

przedmiotu chciano ich mieć większą ilość, musiano za każdym razem powtarzać całą powyższą operacyę. Dlatego też gdy odkryto sposób otrzymywania fotografii na papierze, powitano go jako nader znaczny postęp w nowej sztuce. Podobnie jak nazwiska Nièpce'a i Daguerre'a związane są z pierwotnem odkryciem sposobu otrzymywania trwałych obrazów na kliszach metalowych, tak też nazwiska Talbot'a oraz Blancquard-Evrard'a ściśle łączą się z wynalazkiem klisz papierowych. Fotografia na papierze obejmuje dwie główne czynności: rezultatem pierwszej jest tak zwany *negatyw*, t. j. obraz, którego jasne części odpowiadają ciemnym częściom fotografowanego przedmiotu; podczas drugiej czynności negatyw służy do utworzenia *pozytywnego* obrazu, w którym światłocienie są znowu względem negatywu odwrócone, a więc idą w tym samym porządku, co i na fotografowanym przedmiocie. Sposób Talbot'a, ulepszony znacznie przez Blancquard-Evrard'a, polega na następującem: ćwiartkę cienkiego jednorodnego i ścisłego papieru należy jedną jej powierzchnią zetknąć z roztworem azotanu srebra, tak jednak, ażeby zetknięcie było dokładne i ażeby powierzchnia przeciwna nie została zmoczona. Po kilku minutach odejmuje się papier, rozciąga go na szkle i suszy w ciemności; zupełnie zaś wysuszony zanurza w roztwór jodku potasu i bromku potasu; zachodzi wtedy podwójna chemiczna reakcya, wskutek której tworzą się dwa wrażliwe na światło ciała, a mianowicie jodek srebra i bromek srebra, któremi papier nawskroś nasiąka. Jeżeli tak przygotowany papier fotograficzny zostaje użyty w stanie mokrym, obraz tworzy się na nim w dość krótkim czasie, co przedstawia wielką dogodność, gdy chodzi o zdjęcie fotografii istot żyjących. Papier suchy musi natomiast dłużej być wystawiony na działanie światła, za to jednak można go brać ze sobą w podróż i nadaje się on bardzo dobrze do zdejmowania obrazów widoków natury, pomników i t. p. przedmiotów. Po wyjęciu takiej kliszy z ciemni optycznej nie można nic dostrzedz na jej powierzchni, podobnie jak i na płytach Daguerre'a; obraz występuje dopiero pod działaniem pewnych czynników, jak np. kwasu gallusowego, albo lepiej pyrogallusowego, w roztwór którego na-

leży zanurzyć papier. Organiczny ten kwas (jeden lub drugi) działa na sole srebra we wszystkich tych miejscach, na które działało światło i tutaj też tworzy się połączenie kwasu ze srebrem, o bardzo ciemnej barwie, występującej tem wyraźniej, im silniej operowały promienie świetlne; pojawiający się *obraz jest negatywny*. W celu ochrony od dalszego wpływu światła, obmywa się papier roztworem podsiarkonu sodu lub bromku potasu, przez co zostają oddalone te części soli srebra, które nie uległy zmianie. Negatyw pozwala otrzymywać pozytywne obrazy za pomocą następującej manipulacyi: nasyca się go woskiem tak silnie, że jego miejsca niepoczernione stają się przezroczyste, następnie umieszcza na drugim fotograficznym papierze i kładzie obadwa razem pomiędzy dwie szklane tafle. Jeżeli te ostatnie wystawimy na bezpośrednie działanie promieni słonecznych, albo nawet rozproszonego światła dziennego, wówczas drugi papier pozostanie jasnym w tych wszystkich miejscach, gdzie negatyw jest ciemny, a zczernieje tam, gdzie ten ostatni jest przezroczysty. Otrzymamy tedy obraz, którego światłocienie we właściwym idą porządku, a więc *obraz pozytywny;* uwidocznia się go zaś i utrwala w podobny sposób, jak i negatyw.

Fotografia na papierze znalazła wkrótce bardzo szerokie zastosowanie; wprawdzie nie dorównywa ona, pod względem delikatności rysunku, daguerrotypii, niektóre zaś szczegóły nie mogą być dokładnie uwidocznione z powodu ziarnistej budowy papieru, z drugiej jednak strony ogólny jej wygląd jest bardziej jednolity i dlatego też bywa ona głównie ceniona przez artystów. Zresztą metoda ta uległa znacznym ulepszeniom, które następowały po sobie z zadziwiającą szybkością. Pierwszy postęp polegał na zastąpieniu papieru zwyczajnego przez żelatynowany o powierzchni bardzo gładkiej; znakomitszy zaś krok naprzód został dokonany przez Nièpce'a młodszego, któremu udało się przygotować klisze szklane. Warstwę wrażliwą na światło stanowi tutaj białko, odpowiednio przygotowane, zmieszane z jodkiem potasu i poddane—po uprzedniem rozprowadzeniu na szklanej płycie i wysuszeniu—działaniu azotanu srebra i kwasu octowego. Klisza taka w ciemni optycznej powinna pozostawać pod

działaniem światła w ciągu 15 do 30 sekund; obraz uwidocznia się i utrwala za pomocą kwasu gallusowego i podsiarkonu sodu. Otrzymuje się najprzód negatyw, który służy następnie do zdejmowania obrazów pozytywnych na szkle albuminowanem (to jest pokrytem białkiem), lub na papierze.

Lecz i białko zostało później zastąpione przez bardziej odpowiednią substancyę, mianowicie przez kollodium, t. j. bawełnę strzelniczą, rozpuszczoną w mieszaninie eteru i alkoholu. Sposób ten, odkryty w r. 1851 przez angielskiego fotografa Archer'a, przedstawia tę korzyść, że warstwa kollodiumowa, odpowiednio przygotowana i zmięszana z wiadomemi nam już z powyższych metod substancyami, ulega nadzwyczaj szybko działaniu światła tak, że zdjęcie jest prawie momentalne. Umożliwia to otrzymywanie fotografij osób z ich chwilowym wyrazem twarzy, a nawet przedmiotów znajdujących się w ruchu, jak np. chmur pędzonych wiatrem, fal morskich, zwierząt w biegu i t. p.

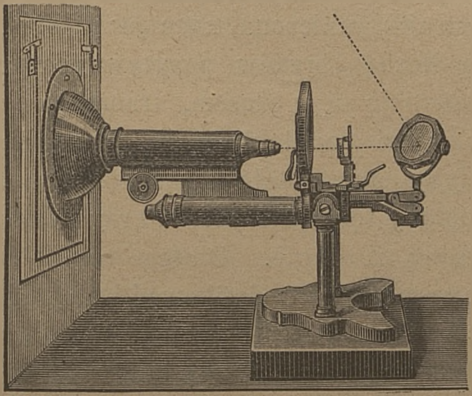


Fig. 348. Mikroskop użyty do fotografii.

Nową, bardzo ważną gałęź fotografii, zwaną *mikrofotografią*, stanowią sposoby otrzymywania powiększonych obrazów przedmiotów mikroskopijnie małych oraz bardzo drobnych obrazów przedmiotów zwykłej wielkości. Pierwsze osiąga się, gdy objektyw ciemni optycznej zastąpiony zostaje przez mikroskop; fig. 348, przedstawiająca, oprócz tego ostatniego, tylko przednią ściankę ciemni, pokazuje, jak należy się przytem urządzić. Mały dany przedmiot silnie się oświeca za pomocą odbitych od zwierciadła promieni; powiększony jego obraz pada na kliszę ciemni optycznej, gdzie w sposób zwykły zostaje utrwalony. Metoda ta daje się zastosować do wszelkich poszukiwań mikrograficznych i pozwala dokładnie zbadać rezultaty tychże; jest ona ważną

szczególnie w zastosowaniu do przedmiotów, mających znaczenie naukowe, należących np. do świata niższych roślin i zwierząt. Druga odmiana mikrofotografii — otrzymywanie maleńkich obrazów—została odkryta przez Bersch'a, następnie zaś udoskonalona przez Dagron'a, Moitessier'a i innych. Sposób ten właśnie pozwala zdejmować zaledwie dostrzegalne fotografie; przy jego pomocy można było, podczas oblężenia Paryża, wysyłać pocztą gołębią długie i obszerne depesze, fotografowane na papierze mikroskopijnych wymiarów i nieznacznego ciężaru, które następnie po odbiorze odczytywano przy pomocy słonecznego mikroskopu (patrz str. 481).

Ilość fotografij, jakie z danego przedmiotu można otrzymać, jest nieograniczona, negatyw bowiem pozwala zdejmować dowolną liczbę obrazów pozytywnych; niestety jednak te ostatnie zmieniają się z czasem, tracąc pod wpływem światła swą wyrazistość oraz dokładność, wreszcie zaś bledną zupełnie. Lecz gdyby nawet udało się nadać im trwałość, to jeszcze przedstawiałyby tę niekorzyść, iż przygotowanie ich wymaga dużo czasu i że są za drogie. Dlatego też oddawna starano się wyżej opisane metody zmodyfikować i ulepszyć w ten sposób, ażeby, zamiast zwykłej, otrzymać fotograficzną kliszę o obrazie wypukłym, z której możnaby robić odbitki, podobnie jak z miedziorytu lub kamienia litograficznego. Myśl ta zajmowała Niépce'a jeszcze wtedy, gdy odkrycie jego poczęło zaledwie kiełkować, a o urzeczywistnienie jej kusili się liczni mężowie nauki i sztuki. Fizeau pierwszy (1841) wynalazł sposób przygotowywania płyt Daguerr'a, które mogły być użyte tak, jak płyty miedziorytnicze, lecz odnośne próby, jakkolwiek godne uwagi, zostały wkrótce zarzucone, mianowicie gdy sama daguerrotypia ustąpiła miejsca fotografii na papierze i szkle. Od owego czasu wynaleziono wiele jeszcze metod, za pomocą których można przygotowywać klisze, nadające się do odbitek; z metod tych rozważymy tutaj jednę tylko, wprowadzoną przez Poitevin'a: Na jakiejkolwiek płycie pokrytej jednostajną warstwą żelatyny, najlepiej zmieszanej z dwuchromianem potasu, umieszcza się, po wysuszeniu, kliszę fotograficzną danego przedmiotu—negatywną albo

pozytywną—i wystawia na działanie bezpośredniego lub rozproszonego światła słonecznego. Można także ową płytę wystawić w ciemni optycznej na wpływ promieni od samego przedmiotu. Po pewnym czasie zanurza się ją w wodzie, gdzie wszystkie te części żelatyny, które nie uległy działaniu światła, pęcznieją, a to z powodu przenikania do nich wody, w tych więc miejscach tworzą się wyniesienia; przeciwnie woda przenika bardzo słabo do tych miejsc, na które wpływało światło tak, że tutaj płyta wydaje się wgłębioną. Wyniesienia odpowiadają tedy cieniom obrazu, wgłębienia zaś—jasnym jego częściom. W taki sposób otrzymuje się na żelatynie wypukły rysunek, który następnie, drogą zwykłej galwanoplastyki (poznamy ją w księdze o elektryczności) przenosi się na płytę miedzianą. Metoda Poitevin'a została ulepszoną po części przez niego samego, po części zaś przez innych i znalazła liczne zastosowania.

Wszystkie sposoby fotografowania, o jakich mówiliśmy dotychczas, dają obrazy wprawdzie bardzo dokładne co do zarysów oraz stopniowania światłocieni, lecz którym brak jednej bardzo ważnej cechy, mianowicie różnorodności barw. Braku tego nie udało się jeszcze w zupełności usunąć, istnieją tylko niezbyt pomyślne odnośne próby. Wollaston, Davy, Seebeck zauważyli już, że chlorek srebra nabiera i zachowuje barwę tych jednorodnych promieni, które nań padają. Doświadczenia ich podjął na nowo Becquerel: odpowiednio przygotowaną płytę, pokrytą warstwą chlorku srebra, poddawał on dwugodzinnemu działaniu widma słonecznego i otrzymał jego wizerunek. Ten ostatni przedstawiał barwę ciemno-purpurową, poprzedzającą czerwień i zależną od promieni, niewidzialnych dla oka, o których niżej pomówimy. Na przeciwnym końcu, po za linią *H*, promienie ultra-fioletowe pozostawiły długi ślad, szarawej barwy, wreszcie pośrednie części pomiędzy liniami *A* i *H*, odmalowały się we właściwych swych kolorach, przyczem maximum jasności wypadało tam, gdzie widmo słoneczne przedstawia największe natężenie świetlne. Barwa żółta była nieco blada, lecz czerwień, zieleń i fiolet wypadły bardzo pomyślnie. Barwy te w ciemności trwały przez krótki czas, przy dziennem zaś świetle znikały

bardzo szybko i Becquerel nie znalazł żadnego środka, ażeby je utrwalić. Gdy na płycie umieścił barwny obraz, otrzymał także, po dostatecznie długiem wystawieniu na światło słoneczne, barwną kopię tegoż obrazu (za pomocą roztworu siarczanu chininy zatrzymywał przytem promienie ultra-fioletowe, które mogłyby kopii tej nadać bardziej szary wygląd).

Nièpce młodszy zmienił nieco ostatni sposób i zdołał również otrzymać barwne kopie obrazów. Podczas doświadczeń swych przekonał się on, że wystąpienie tej lub owej barwy zależy w bardzo znacznym stopniu od stężenia roztworu chloru, służącego do przygotowania kliszy. Przy użyciu słabego roztworu, żółtą barwę otrzymuje się najłatwiej, w miarę zaś powiększania zawartości chloru, występują także: zielona, niebieska i fioletowa, najmniej zaś łamliwe, t. j. czerwona i pomarańczowa wymagają najbardziej stężonych roztworów. Niestety rezultaty te, wysoce interesujące ze stanowiska czystej nauki, nie dały się zastosować w praktycznej fotografii, a to dlatego, że barwy owe, jak już powiedzieliśmy, istnieją na kliszy tylko tak długo, dopóki ta znajduje się w zupełnej ciemności. To samo dotyczy barw, otrzymanych na kliszy odmienną nieco metodą Poitevin'a. Dlatego też próbowano na innej drodze znaleźć rozwiązanie zajmującej nas tutaj kwestyi. Starano się przygotować każdą barwę oddzielnie i dopiero przez połączenie ich odtworzyć naturalną barwę przedmiotu, analogicznie do tego, jak postępuje się przy chromolitografii. To właśnie zadanie zostało rozstrzygnięte przez dwóch fotografów i przez jednego z nich (Ducos du Hauron'a) zastosowane w praktyce. O wiele zaś ważniejsze zadanie, a mianowicie możność otrzymywania barwnych i trwałych fotografij w sposób ściśle analogiczny do tego, jaki daje nam obecnie fotografie zwykłe, należy jeszcze do przyszłości.

Na zakończenie niniejszego rozdziału wspomnimy jeszcze w kilku słowach o innego rodzaju promieniach niewidzialnych, wysyłanych przez ciała świecące. Badając różne części widma słonecznego pod względem ich natężenia świetlnego, przekonywamy się, że to ostatnie, słabe w czerwieni, wzrasta stopniowo aż do żółtej barwy, gdzie dosięga swego maximum, poczem znów

słabnie do skrajnego fioletu. Inaczej się rzeczy mają z ciepłotą rzeczonych części: przesuwając wzdłuż widma przyrząd, bardzo czuły na zmiany ciepłoty, znajdziemy, że wzrasta ona wciąż w kierunku od fioletu do czerwieni, oraz że—co ciekawsze—wpływ cieplny nie kończy się na granicy tej ostatniej, lecz rozciąga się po za nią na znacznej przestrzeni. Wnosimy z tego, że istnieją promienie jeszcze mniej łamliwe, niż czerwone; nazywamy je *ultra-czerwonemi*. Nie działają one na nasz zmysł wzroku, to znaczy, że są ciemne, obecność ich jednak łatwo wykazać za pomocą czułego termometru. Słońce wysyła trojakiego rodzaju promienie: cieplne, świetlne i chemiczne, które przy przejściu przez pryzmat, rozszczepiają się i układają w widmie podług stopnia swej łamliwości. Każde w ogóle źródło światła, obok promieni świetlnych, wysyła także ciemne, ciała zaś ogrzane, lecz nie doprowadzone jeszcze do stanu rozżarzenia, dają tylko ciemne promienie, których nie widzimy. Podobnie bowiem, jak ucho odróżnia tylko pewne tony, zawarte pomiędzy dwiema granicami, odpowiadającemi określonej, niezbyt małej, ani zbyt wielkiej liczbie drgań, tak też i oko może odczuć jako światło tylko te promienie, których łamliwość nie przekracza pewnej maximalnej i minimalnej granicy. O promieniach cieplnych obszerniej pomówimy w następnej księdze.

ROZDZIAŁ IX.

Teorya światła.

§ 1. Doświadczenie Fresnel'a. Falowy ruch eteru.

Rozpatrzyliśmy dotychczas cały szereg zjawisk świetlnych oraz odnośnych praw, wykrytych na drodze empirycznej, nie dotykając przytem wcale pytania, czem właściwie jest światło. Obecnie przystępujemy do opisu takich faktów z dziedziny optyki, które wymagają koniecznie bliższego zastanowienia się nad powyższem pytaniem, a jednocześnie dają nam klucz do jego rozwiązania.

W roku 1665 ojciec Grimaldi wydał zadziwiającą książkę pod tytułem *Physico-mathesis de lumine*, w której po raz pierwszy wspomina o pewnem zjawisku, zauważonem przezeń podczas następujących doświadczeń. Na drodze wiązki światła, wpadającego do ciemnego pokoju przez ciasną szczelinę, umieszczał on bardzo wązkie, nieprzezroczyste przedmioty, w kierunku równoległym do szczeliny i cień ich rzucał na biały ekran. Okazało się najprzód, że cień był szerszy, niż należało tego oczekiwać na zasadzie praw prostolinijnego rozchodzenia się światła, następnie że był otoczony barwnemi prążkami, równoległemi do szczeliny. Zjawisko to znikało natychmiast, gdy tę ostatnią nieco rozszerzano. Jeżeli na miejscu nieprzezroczystego ciała umieszczano ściankę metalową o bardzo delikatnym okrągłym otworze, a po za nią biały ekran, wtedy pojawiały się na nim współśrodkowe barwne pierścienie, zajmujące po części tę przestrzeń, która właściwie powinna była być zupełnie ciemna. Wreszcie gdy w ściance metalowej znajdowały się dwa bardzo małe, okrągłe otwory, nader blizko siebie leżące, wtedy można było nietylko zauważyć dwa układy współśrodkowych pierścieni, po części krzyżujących się wzajemnie, lecz także trzy systemy *ciemnych równoległych linii*, które znikały natychmiast, gdy zatykano jeden z otworów (fig. 349). Ostatnie doświadczenie wywołało ogromne zdumienie pomiędzy fizykami, obalało bowiem ówczesne pojęcia o istocie światła i prowadziło do wcale nieoczekiwanego rezultatu, że światło, dodane do innego światła, może spowodować ciemność. Newton powtórzył i rozszerzył doświadczenia włoskiego fizyka, przyczem starał się objaśnić przyczynę owego zadziwiającego zjawiska, lecz nadaremnie. Odnośne badania na nowo podjęli następnie Fraunhofer, Young, a szczególniej Fresnel i wtedy dopiero udało się wyświetlić powyższą zagadkę. Podamy tutaj opis słynnego doświadczenia Fresnel'a.



Fig. 349. Układ pierścieni i ciemnych linii w doświadczeniu Grimaldi'ego,

Dwa szklane zwierciadła $A\ B$ i $B\ C$ (fig. 350) o poczernionej tylnej powierzchni stykają się wzdłuż pionowej krawędzi B; jedno z nich ($B\ C$) jest stale przymocowane szrubą T, drugie zaś ($A\ B$) może być obracane za pomocą szruby S, wokoło tejże krawędzi. Figura 351 przedstawia szematycznie wypadek, gdy są one nachylone do siebie pod bardzo rozwartym kątem, równym prawie 180°. W blizkości zwierciadeł znajduje się soczewka L o małej odległości ogniskowej, która zbiera padające na nią promienie świetlne w ognisku P; z tego też punktu świecącego promienie padają następnie na obadwa zwierciadła. Jedno z nich $A\ B$ odbija promienie tak, że zdają się wychodzić z punktu M, który stanowi w ten sposób urojony obraz ogniska P; podobnie w zwierciedle $B\ C$ powstaje drugi obraz N tegoż ogniska.

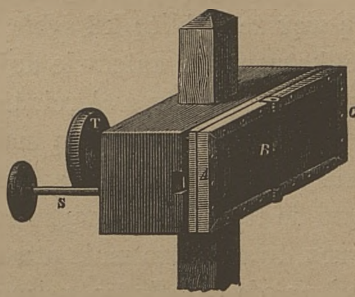


Fig. 350. Zwierciadła Fresnel'a.

Nawiasowo dodamy tutaj, że zwierciadła muszą być przygotowane z czarnego szkła albo z metalu, dlatego, ażeby każde z nich posiadało tylko jedną powierzchnię odbijającą i dawało tylko jeden obraz. Otrzymujemy tedy dwa świetlne stożki $M\ m\ m'$ i $N\ n\ n'$, których wierzchołki M i N możemy uważać jakby za dwa rzeczywiste źródła światła; widzimy, że stożki te, zachodząc jeden na drugi, zajmują wspólną część $B\ m\ n$ przestrzeni, na rysunku zacienioną. Jeżeli na drodze ich ustawimy

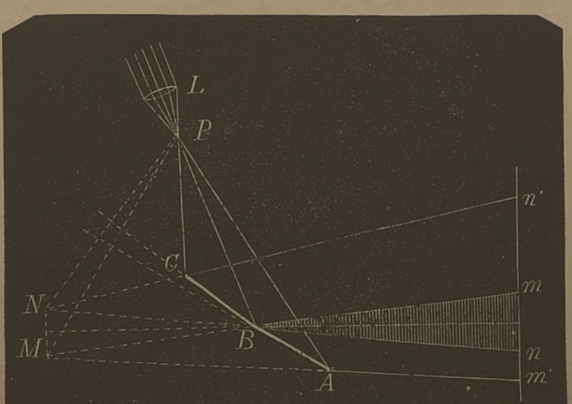


Fig. 351. Doświadczenie Fresnel'a.

ekran $m' n'$, wtedy to miejsce na nim, które przetnie ową wspólną część, czyli pole $m n$, będzie jednocześnie oświecone przez obadwa stożki. Na tem właśnie polu oprócz jasnych, widać szereg *ciemnych linii, które znikają wszakże natychmiast, gdy jedno ze zwierciadeł zostaje zasłonięte.* Gdy przez obracanie szruby S zmniejszymy kąt pomiędzy zwierciadłami, owe ciemne linie staną się węższe i zbliżą ku sobie; w ten sposób możemy je uczynić tak delikatnemi, że zaledwie dają się odróżnić. Są one zaś wyraźne tylko wtedy, gdy zwierciadła stanowią kąt bardzo rozwarty, t. j. gdy obrazy M i N leżą nader blizko jeden od drugiego. Widzimy, że doświadczenie Fresnel'a przedstawia wielkie podobieństwo do tego, jakie wykonał Grimaldi, przepuszczając światło przez dwa bardzo małe otwory; tutaj, również jak i tam, *światło dodane do światła w pewnych warunkach, powoduje ciemność*; w jednym i w drugim razie na ekranie powstają ciemne linie wówczas, gdy padają nań promienie jednocześnie z dwóch świetlnych punktów, znikają zaś, gdy jeden z tych ostatnich jest zasłonięty. Zobaczmy tedy, w jaki sposób nauka o istocie światła objaśnia to na pozór niepojęte zjawisko, którego, jak powiedzieliśmy, nie umiał sobie wytłómaczyć taki nawet genialny uczony, jak Newton, a to z przyczyn, które wkrótce staną się dla nas zupełnie jasne.

Wiemy, że światło nie rozprzestrzenia się momentalnie, lecz wymaga pewnego czasu na przebycie drogi od jednego punktu do innego. To każe nam wnosić, że każde świecące ciało stanowi źródło jakiegoś działania, które w pewien sposób przenosi się na nerw wzrokowy i wywołuje w nas wrażenie światła. Zachodzi tylko pytanie, czy przenoszenie się owego działania polega na tem, że samo świecące ciało wysyła pewną substancyę we wszystkich kierunkach, czy też powoduje ono tylko wstrząśnienia, udzielające się w przestrzeni od cząstki danego środka do cząstki. Podług dawniejszej teoryi, zwanej *emissyjną*, głównym zwolennikiem której był Newton, światło składa się właśnie z cząstek materyi nadzwyczajnie subtelnych, ustawicznie wyrzucanych przez źródło świetlne i przebiegających przestrzeń z jednakową dla wszystkich nich prędkością; uderzenia tych cząstek

KSIĘGARNIA NAKŁADOWA

H. OLAWSKIEGO

Mazowiecka Nr. 6,

POLECA:

HISTORYĘ NATURALNĄ

D-ra G. Hayeka,

zawierającą 72 tablic zoologicznych z 845 kolorowanemi figurami, 40 tablic botanicznych z 445 kolorowanemi figurami i 8 mineralogicznych z 75 figurami. — Cena kompletu Rs. **18**; w ozdobnej oprawie Rs. **22.**

Także do nabycia (tak długo jak zapas starczy)

w 30-tu zeszytach po kopiejek **60.**

Autorowi dzieła *przyznano* na wystawie w Tryeście w r. 1882 **złoty medal** w dziale sztuk i nauk.

HISTORYĘ POWSZECHNĄ

BECKERA,

w przekładzie dopełnionym i uzupełnionym

w epoce dziejów najnowszych,

pod redakcyą **M. Wołowskiego,** w 12 tomach po Rs. **1** kop. **10** za tom (oprawne tomy zawierające po 2 tomy po Rs. **2** kop. **50**) lub w zeszytach po kop. **10.**

GEOGRAFJĘ POPULARNĄ

czyli

Ziemia w malowniczych obrazach.

Opisy najciekawszych krajów, ludów i miejscowości według najnowszych źródeł i najcelniejszych autorów, opracował

Dr. Wł. Wicherkiewicz,

z mapkami i drzeworytami, w 53-ch zeszytach po kop **15.**

Podręczniki do nauki języków obcych

(Z WYMOWĄ)

podług metody **D-ra H. Loewego.**

JĘZYK FRANCUZKI	*JĘZYK NIEMIECKI*
ze słownikiem	ze słownikiem
francuzko-polskim i polsko-francuzkim,	polsko-niemieckim i niemiecko-polskim,
komplet w 25 zeszytach	**komplet w 25 zeszytach**
po 15 kop.	**po 15 kop.**

Roznosiciele mają Prospekty i Zeszyty na okaz!

Roznosiciele mają Prospekty i Zeszyty na okaz!

Дозволено Цензурою, Варшава 21 Апрѣля 1889 г.

Druk Jana Cotty w Warszawie, Senatorska 29.

Cena 20 kop.

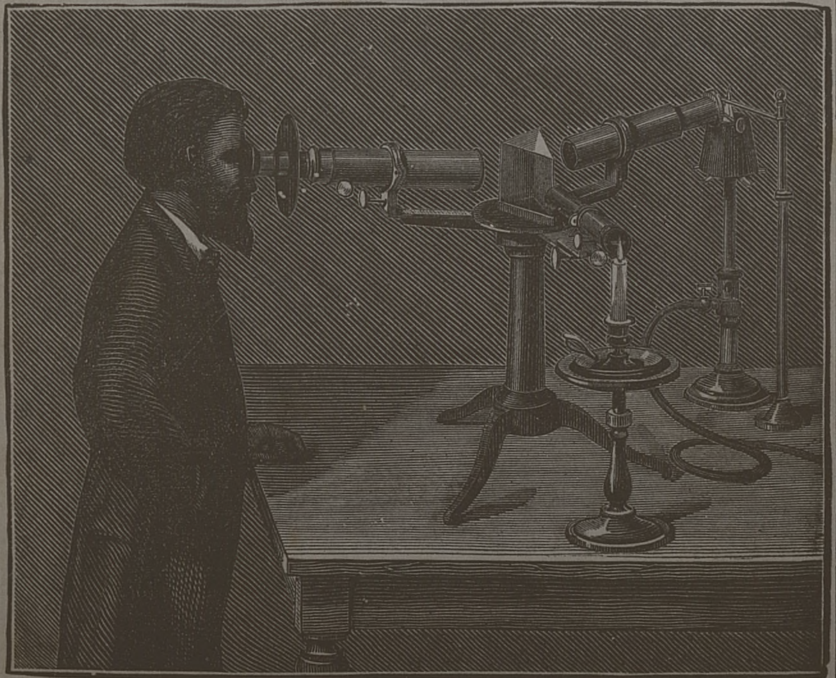
Zeszyt 18.

Cena 20 kop.

SIŁY PRZYRODY.

POPULARNY WYKŁAD FIZYKI

I GŁÓWNIEJSZYCH JEJ ZASTOSOWAŃ.



Spektroskop.

Podług dzieła A. Guillemin'a „Le monde physique"

OPRACOWALI

Józefowa Nusbaum

bak. n. prz.

i

Henryk Silberstein

dr. fil., b. as. chem. przy un. w Bernie.

WARSZAWA.

Nakładem Księgarni **H. Olawskiego**, ul. Mazowiecka № 6.

1889.

o siatkówkę mają powodować wstrząśnienie nerwu wzrokowego, odczuwane następnie jako wrażenie światła. Cząstki te, uczy dalej teorya emissyjna, ulegają siłom przyciągającym i odpychającym ze strony materyi, o którą uderzają: pierwsze siły wywołują załamanie światła, drugie zaś—jego odbicie; istnieje tyle rodzajów takich cząstek, ile jest oddzielnych barw, przyczem każdy z nich w rozmaitym stopniu załamuje się przy przejściu z jednego środka do drugiego. Szereg następujących po sobie jednakowych cząstek stanowi promień świetlny, przyczem odstępy pomiędzy niemi mogą być bardzo znaczne; ponieważ wrażenie światła w oku naszem trwa przez $^1/_{10}$ sekundy, to dla ciągłości jego wystarczy, jeżeli uderzenia cząstek będą następowały po sobie w takim właśnie odstępie czasu. Gdyby więc w ciągu sekundy w tym samym kierunku przebiegło tylko dziesięć cząstek, wynikałoby z tego, że odległość pomiędzy dwiema sąsiedniemi cząstkami wynosi 30000 kilom. (droga, przebyta przez światło w ciągu sekundy, podzielona przez ilość cząstek, które ją w tym czasie przebyły); gdyby ich nawet przeszło sto, to i tak odległość pomiędzy niemi wynosiłaby 3000 kilom. W ten sposób możnaby objaśnić, dlaczego promienie, wychodzące z różnych punktów, mogą przecinać się wzajemnie, nie przeszkadzając sobie wcale. Masa takiej cząstki, obliczona na zasadzie pewnych praw mechaniki, jest tak minimalnej wielkości, że nie możemy jej sobie wcale naocznie przedstawić. „Gdyby, powiada John Herschel, cząstka światła przy swej prędkości posiadała wagę jednego grana (0,065 grama), wywarłaby przez swe uderzenie taki sam skutek, jak kula armatnia, ważąca 56000 gramów i biegnąca z szybkością 305 metrów na sekundę; jakże więc niezmiernie małe muszą być te cząstki światła, skoro myriady ich, padające na soczewki lub zwierciadła, nie nadają najlżejszego nawet ruchu najczulszym przyrządom, specyalnie do tego celu przygotowanym“. Jak już wspomnieliśmy, Newton objaśniał zjawisko załamania przez to, że cząstki świetlne ulegają przyciąganiu ze strony substancyj załamujących. Otóż przyjąwszy, że przyciąganie to działa tylko na bardzo małej odległości i obliczywszy przytem siłę przyciągającą w wypadku, gdy cząstka

zbacza z pierwotnej swej drogi o 30^0, okazuje się, że do tego potrzebaby siły niemniej jak dwa tysiące septilionów razy większej od tej, z jaką ziemia przyciąga takąż cząstkę. Rezultat ten, w obec przypuszczalnej niezmiernie małej masy cząstek światła, nie bardzo się przyczynia do nadania teoryi emissyjnej wielkiego prawdopodobieństwa. W wypadku tym bowiem nie wielkość cyfr przemawia na niekorzyść tej teoryi—albowiem i druga z nich prowadzi do wartości, z trudnością dających się uświadomić — lecz małe prawdopodobieństwo, jakie istnieje w przypuszczeniu, iż tak olbrzymia siła może rozwinąć się przy tak nieskończenie małych masach. Zresztą, gdyby nawet nie istniały podobne zarzuty, to i tak bezpośrednie, faktyczne dowody zmusiłyby uczonych do porzucenia emissyjnej teoryi światła. Jedną z najważniejszych trudności, stanowiących dla niej nieprzebytą zaporę, były opisane wyżej wyniki doświadczeń, w których światło dodane do światła powodowało ciemność (interferencya światła. Fakt ten nie daje się w żaden sposób pogodzić z teoryą, głoszącą, że światło jest materyą, wysyłaną przez źródło tegoż. Później odkryto inny fakt, niemniej sprzeczny z rzeczoną teoryą: Jeden z jej wniosków, wyprowadzony jeszcze przez Newtona, głosi, że prędkość światła w środkach gęściejszych winna być większa, niż w mniej gęstych. Otóż doświadczenia Fizeau i Foucaulta dały rezultat wręcz przeciwny: w szkle światło rozchodzi się *wolniej*, niż w powietrzu. Dwa te fakty: interferencya światła oraz zmniejszanie się jego prędkości przy przejściu ze środka mniej gęstego do więcej gęstego—ostatecznie obaliły teoryę emissyjną, która ustąpiła miejsca prawie powszechnie przyjętej obecnie teoryi *falowania światła* czyli teoryi *undulacyjnej*. Ta ostatnia dozwala rozpatrywać z jednego punktu widzenia nietylko znane zjawiska świetlne, ale nadto łączy z niemi przejawy ciepła promienistego (o których pomówimy w następnej księdze) i pewne zjawiska elektryczne; oprócz tego, przedstawiając zjawiska świetlne w analogii z dźwiękowemi, ułatwia znakomicie zrozumienie pierwszych. W ten sposób przyczynia się ona do ustalenia nauki o jedności sił przyrody. Do rozwoju i ugruntowania teoryi undulacyjnej przyczynili się głównie

Huyghens, Hooke, Euler, w naszem zaś stuleciu Young, Fresnel i wielu innych. Z poprzedniej księgi dowiedzieliśmy się, że każde ciało dźwięczące znajduje się w stanie ruchu drgającego, który udziela się otaczającemu powietrzu, wskutek czego w tem ostatniem tworzą się fale, dochodzące do ucha naszego i powodujące w niem wrażenie dźwięku. Podobnie i ruch, wychodzący z każdego ciała świecącego, przenosi się, według teoryi undulacyjnej, za pomocą pewnego sprężystego środka, wypełniającego przestrzeń pomiędzy niem a ciałem oświeconem; każda cząstka tego środka przejmuje ruch swej poprzedniczki i przenosi go dalej, przyczem żadna z nich nie oddala się po za pewną nader nieznaczną odległość od pierwotnego swego położenia. Lecz co stanowi ów sprężysty środek, przenoszący drgania świetlne? Powietrze środkiem tym być nie może, względnie bowiem cienka tylko jego warstwa otacza ziemię, a może i inne jeszcze ciała niebieskie; w niezmierzonych za to przestrzeniach, przez które dochodzi do nas światło słońca i gwiazd, nie ma wcale powietrza. Należy przyjąć, że wszechświat wypełniony jest materyą sprężystą, nadzwyczaj subtelną i nieważką, nie przedstawiającą żadnego znaczniejszego oporu poruszającym się w niej ciałom; hipotetyczny ten środek zowiemy *eterem* i on to właśnie służy jako pośrednik przy przenoszeniu ruchu drgającego ciał świecących. Zobaczmy tedy, jak należy sobie wyobrazić stan jego podczas rozchodzenia się w nim światła.

Czytelnik przypomina sobie, że podczas rozprzestrzeniania się dźwięku w powietrzu, cząstki tego ostatniego drgają tam i napowrót w samym kierunku rozchodzenia się fal dźwiękowych (str. 261); przy falowaniu zaś wody, cząstki jej oscylują w górę i na dół, t. j. w kierunku, prostopadłym do kierunku rozchodzenia się fal wodnych. Otóż światło polega właśnie na ostatniego rodzaju drganiach cząstek eteru—drganiach zwanych *poprzecznemi*. Rozważmy je nieco bliżej: Niechaj A, B, C, D, E (fig. 352) przedstawia szereg przyciągających się wzajemnie cząstek w stanie równowagi; przypuśćmy, że wskutek jakiegoś wstrząśnienia, zaszłego w kierunku prostopadłym do linii AE, cząstka A zajmuje położenie A'. Ta zmiana miejsca narusza pierwotny stan

równowagi: cząstka A' stara się pociągnąć za sobą sąsiednią cząstkę B', która ulega jednocześnie z drugiej strony przyciąganiu cząstki C'; otóż pewne prawa, w które nie możemy się tutaj wdawać, pokazują, że przy takim układzie sił cząstka B' poruszy się, również jak i pierwsza, w kierunku prostopadłym do szeregu cząstek. W czasie, gdy B' opuszcza się ku dołowi i przybywa do B'', cząstka A' wraca do pierwotnego położenia i w danej chwili mamy układ A'' B'' C'' D'' E''. Następnie cząstka A'' wskutek nabytej prędkości, podnosi się w górę do A''' na wysokość, ściśle równą tej, na jaką poprzednio się opuściła, B'' wraca do położenia B czyli B''', cząstka zaś C''' rozpoczyna swój ruch, przyczem powstaje układ A''' B''' C''' D''' E''', zmieniający się potem w A'''' B'''' C'''' D'''' E'''' i t. d. Widzimy tedy, że sposób udzielania się drgań poprzecznych, jest podobny do tego, w jaki przenoszą się drgania podłu-

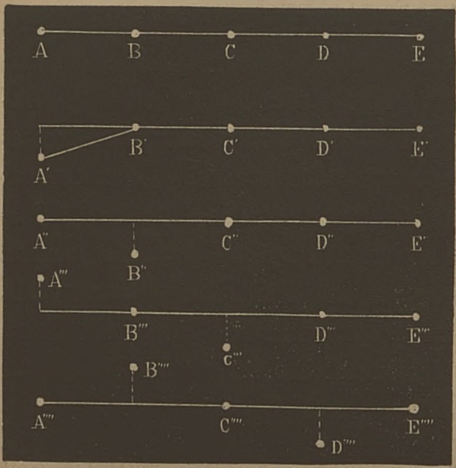


Fig. 352. Sposób rozchodzenia się fal poprzecznych.

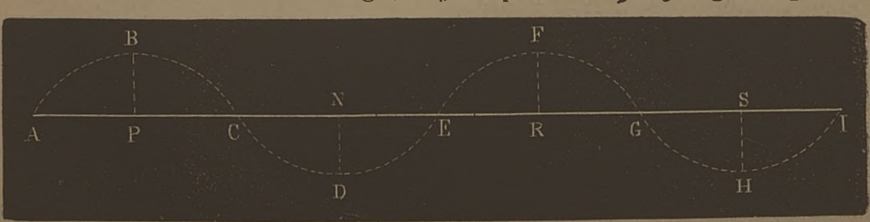


Fig. 353. Fala poprzeczna.

żne, z tą wszakże różnicą, że te ostatnie powodują szereg zgęszczeń i rozrzedzeń, podczas pierwszych zaś cząstki drgające ulegają tylko kolejnym i prawidłowym bocznym przesunięciom w kierunku prostopadłym do kierunku rozchodzenia się światła. Fig. 353 przedstawia cząstki o wiele bliżej siebie leżące, niż w poprzednim wypadku; układ ich w danej chwili ruchu drgającego odpowiada

fazie A'''' B'''' C'''' D'''' E'''' (fig. 352). Połączywszy je, otrzymujemy linię falową *A B C D E*... zupełnie podobną do linii, wyobrażającej fale dźwiękowe (str. 258), lecz gdy w tej ostatniej zagięcia ku górze i dołowi przedstawiają tylko obrazowo zgęszczenia i rozrzedzenia powietrza, w wypadku drgań poprzecznych każdy punkt linii wyobraża istotne położenie drgającej cząstki w pewnym momencie: tutaj wyniesienia obejmują te cząstki, które wzniosły się po nad pierwotną linię równowagi, zagłębienia zaś odpowiadają tym, które się pod nią opuściły. Podczas gdy cząstka wykonywa jedną całkowitą oscylacyę, t. j. gdy opuszcza się do A', powraca do A'', wznosi się do A''' i znów wraca do A'''', tworzy się wokoło niej całkowita fala, składająca się z jednego wyniesienia i jednego zagłębienia. Gdy fala ta biegnie dalej, następne oscylacye owej cząstki powodują nowe fale, które bezpośrednio idą za pierwszą i w ten sposób wokoło punktu, z którego ruch pierwotnie się rozpoczął, powstaje cały system fal. Linia prosta, poprowadzona ze środka takiego systemu w kierunku rozchodzenia się ruchu, stanowi *promień;* ta część jego, która obejmuje jedno wyniesienie i jedno zagłębienie, zowie się *długością fali;* na fig. 353 przedstawione są dwie takie długości. Te cząstki, których odległość na tym samym promieniu wynosi jedną lub więcej całkowitych fali, znajdują się jednocześnie w tej samej fazie oscylacyi, cząstki np. *B* i *F*, oddalone o jedną długość fali, zajmują obydwie najwyższe położenie, z którego poczynają się obniżać, cząstki *A* i *E* przechodzą przez położenie równowagi, dążąc ku górze i t. d. Cząstki zaś *B* i *D*, oddalone o pół fali, znajdują się w fazach oscylacyi wprost przeciwnych, podczas bowiem gdy pierwsza z najwyższego swego położenia poczyna się opuszczać, druga z najniższego zaczyna ruch swój ku górze; to samo stosuje się do cząstek *B* i *H*, oddalonych o trzy pół fale. W ogóle widzimy, że fazy cząstek są te same, gdy odległość pomiędzy niemi równa się parzystej liczbie pół-fal, są zaś wprost przeciwne, gdy odległość ta wynosi nieparzystą liczbę pół-fal.

Oto w krótkich zarysach teorya falowania eteru, za pomocą którego światło od źródła swego przenosi się w przestrzeń daleką.

Zobaczmy teraz, jak teorya ta objaśnia znane nam już zjawiska świetlne; w jakich, według niej, warunkach powstaje interferencya światła, jak tłómaczy barwy, od czego zależy natężenie światła, jak należy sobie przedstawić rozszczepienie jego i pochłanianie? Na wszystkie te pytania postaramy się odpowiedzieć w następnych paragrafach niniejszej księgi.

§ 2. Interferencya światła. Długość fali i częstość drgań dla różnych barw. Amplituda drgań.

Czytelnik zechce przypomnić sobie rezultat krzyżowania się dwóch jednakowych systemów fal na powierzchni wody, przy jednakowej amplitudzie drgania cząstek, należących do obu systemów (str. 344): tam, gdzie wyniesienie jednej fali zlewa się z wyniesieniem drugiej, cząstka wody podnosi się na podwójną wysokość, tam zaś, gdzie zagłębienie schodzi się z zagłębieniem, cząstka opuszcza się dwa razy niżej, niż przy pojedyńczej fali, tam wreszcie, gdzie wyniesienie jednej fali spotyka zagłębienie drugiej, cząstka pozostaje w spoczynku. Wiemy także, że rezultat ten stanowi tylko szczegółowy wypadek ogólnego prawa nakładania się różnych systemów fal, podług którego wypadkowy ruch drgający każdej oddzielnej cząstki równa się sumie jednokierunkowych, albo różnicy różnokierunkowych ruchów składowych (patrz str. 345). Stosuje się to zarówno do rozchodzenia się fal wodnych, jak i dźwiękowych oraz świetlnych; podobnie bowiem jak ciecze i powietrze, tak też i eter świetlny może przejmować naraz wiele ruchów oscylacyjnych. Impulsy, jednocześnie otrzymywane przez daną cząstkę, mogą się wzajemnie wzmacniać, albo też całkowicie lub częściowo znosić; co przy falach cieczy powoduje *spokój*, to przy falach dźwiękowych wywołuje *ciszę*, przy świetlnych zaś — *ciemność*. Doświadczenia Grimaldi'ego oraz Fresnel'a, opisane na początku 1 § niniejszego rozdziału, są tylko zwykłemi zjawiskami *interferencyi światła*, polegającej na tem, że fale świetlne wzajemnie się zobojętniają *przy zupełnie podobnych warunkach, przy jakich zachodzi także interferencya dźwięku* (patrz stronicę 348). Po-

nieważ warunki te omówiliśmy wówczas bardzo obszernie, zbytecznem więc byłoby tutaj jeszcze raz je rozważyć. W doświadczeniu Grimaldi'ego ciemne linie na ekranie pojawiały się w tych miejscach, gdzie jednocześnie padały promienie przez obadwa otwory ścianki, przyczem jeden promień wyprzedzał drugi o nieparzystą liczbę pół-fal; każda z cząstek eteru, leżących na drodze tych promieni, znajdując się pod wpływem dwóch równych (przy jednakowej amplitudzie drgań), lecz skierowanych w przeciwne strony impulsów, pozostawała w spoczynku. Ażeby jednak dwa podobne systemy fal mogły spowodować zupełnie wyraźne ciemne linie, powinny one wychodzić nietylko jednocześnie, lecz w dokładnie analogiczny sposób z dwóch źródeł światła, to znaczy, że wszelkie zmiany, jak np. wzmocnienie ruchu lub jego osłabienie, przerwa, albo też inne przeszkody, zachodzące w jednem ze źródeł, powinny jednocześnie także odbywać się w drugiem. Nie możemy atoli tak uregulować procesu świecenia w dwóch ciałach, ani nawet w dwóch punktach tego samego ciała, ażeby drgający ruch, wychodzący z jednego z nich, nie różnił się pod żadnym względem, *oprócz różnicy w fazie oscylacyi*, od takiegoż ruchu, wychodzącego z drugiego punktu. Z tego właśnie względu należy uważać doświadczenie Grimaldi'ego za niezupełnie dokładne, interferujące bowiem ze sobą systemy fal wychodziły z dwóch oddzielnych punktów świetlnego źródła. Metoda zaś, jaką posługiwał się Fresnel przy wywoływaniu zjawiska interferencyi, pozwoliła otrzymać, przez odbicie od dwóch zwierciadeł, oba systemy fal z jednego i tego samego świecącego punktu. Wszelkie zmiany w tym ostatnim występowały przez to zupełnie jednakowo w obu systemach fal (fig. 351), nie wpływając wcale na ich koincydencyę lub interferencyę tak, że promienie, wychodzące jakby z punktów M i N, różniły się tylko pod względem drogi przebytej. Fig. 354 (str. 552) unaocznia właśnie krzyżowanie się współśrodkowych fal świetlnych, wychodzących z M i N. Otóż do tych punktów, które, jak np. a, leżą na linii $B\,A'$ prostopadłej do linii $M\,N$, promienie obu systemów dochodzą w jednakowych fazach, albowiem odległości $M\,a$ i $N\,a$, a właściwiej drogi $P\,J\,a$ i $P\,J'\,a$, przebyte przez promienie, wy-

chodzące jednocześnie z ogniska *P* i odbite od zwierciadeł, są sobie równe. W punkcie *a*, również jak i we wszystkich pozostałych, leżących w tym samym co i on pionowym kierunku, fale wzajemnie się wzmacniają i dają środkową jasną linię. Do punktów natomiast jak *n n'*, leżących z boku *B A'*, dochodzą promienie z *M* i *N*, różniące się o pół fali, a więc o fazach przeciwnych, tutaj więc następuje interferencya i punkty te tworzą pierwszą ciemną linię. Idąc dalej po tej samej stronie, napotykamy punkty *b b'*, w których różnica faz wynosi całą długość fali,

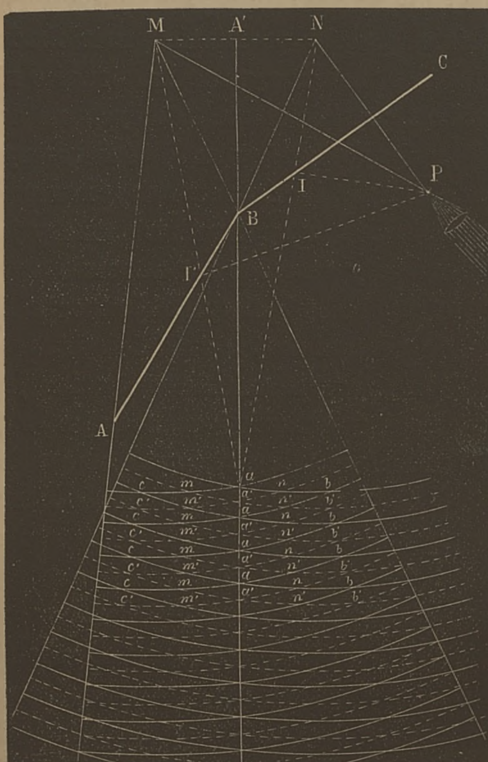


Fig. 354. Interferencya światła (w doświadczeniu Fresnel'a).

co znaczy to samo, jak gdyby wcale nie było żadnej w fazach różnicy; *b* i *b'* dają tedy znów jasną linię. W podobny sposób po drugiej stronie linii *B A'* punkty *m m'* są ciemne, *c c'* zaś jasne i t. d. Figura 355 przedstawia ekran umieszczony pionowo, w kierunku prostopadłym do linii *B A'*, w pewnej odległości przed zwierciadłami; widzimy na nim szereg kolejno po sobie następujących jasnych i ciemnych linii, oznaczonych lite-



Fig. 355. Ciemne linie interferencyjne.

rami, odpowiadającemi literom dla jasnych i ciemnych punktów poprzedzającej figury.

To, cośmy tutaj powiedzieli o kolejnem następstwie jasnych i ciemnych linii, stosuje się tylko w wypadku, gdy do doświadczenia zostaje użyte światło jednorodne, przy użyciu zaś światła białego, zjawisko, jak zaraz zobaczymy, przedstawia się nieco inaczej. Jeżeli na soczewkę L (patrz fig. 351) rzuca się najprzód promienie czerwone, następnie po usunięciu tych ostatnich, powtarza to samo z promieniami niebieskiemi, można zauważyć, że w pierwszym razie linie na ekranie są bardziej rozsunięte, niż w drugim, to znaczy, że ciemne linie dla promieni czerwonych więcej są oddalone od środkowej jasnej, niż odpowiednie ciemne linie dla promieni niebieskich. Z tego wynika, że wzajemne zobojętnienie dwóch promieni niebieskich wymaga mniejszej różnicy w przebytej drodze, niż promieni czerwonych; od wniosku tego krok już tylko jeden do innego, a mianowicie, że *długość fali dla światła niebieskiego jest mniejsza, niż dla czerwonego.* Powtarzając podobne doświadczenia z pozostałemi jednorodnemi barwami, przekonywamy się, że w ogóle im dane światło jest bardziej łamliwe, tem linie, jakie ono daje na ekranie, są bardziej ścieśnione, a więc tem mniejszą jest odpowiadająca mu długość fali. Przy doświadczeniach takich można się posługiwać widmem—rozumie się o dostatecznie silnem natężeniu—którego oddzielne barwy kolejno rzuca się na soczewkę, a więc i na zwierciadła. Przy użyciu białego światła linie na ekranie nie są tylko naprzemian jasne lub ciemne, ale także zabarwione. Środkowa jasna linia, gdzie mieszają się ze sobą wszystkie barwy o największem natężeniu, jest biała; z boków jej znika najprzód fiolet, następnie mniej łamliwe promienie, wskutek czego linia ta na wewnątrz otoczona jest rąbkiem żółtawym, na zewnątrz zaś czerwonawym. Tam, gdzie zanika barwa żółta, powstaje pierwsza ciemna linia, która przedstawia jednak słaby fioletowy odcień, albowiem ta ostatnia barwa w miejscu tem stała się mocniejszą. Następnie idzie kilka barwnych jasnych linii, druga ciemna, znów barwne, aż wreszcie, dzięki mięszaniu się rozmaitych barw, pozostaje jednostajna biel. Białe światło daje tedy

nieliczne i coraz mniej wyraźne linie, przy jednorodnem zaś ciemne linie są zupełnie czarne i ukazują się w wielkiej ilości.

Powiedzieliśmy wyżej, że pierwsza ciemna linia na ekranie, po za środkową jasną, powstaje przez dwa promienie, których różnica równa się połowie długości fali. Otóż, jeżeli zmierzymy dokładnie długość tych promieni dla jakiegokolwiek światła jednorodnego (a istnieją na to sposoby), czyli odległości każdego z dwóch źródeł światła od pierwszej ciemnej linii, to różnica ich da nam zarazem wielkość pół-fali dla tegoż światła; zupełnie tak samo można znaleść długość fali dźwiękowej, odpowiadającej badanemu tonowi, z interferencyi dźwięku, którą możemy otrzymać za pomocą stosownego przyrządu, przedstawionego na fig. 232, str. 348. Przez powtarzanie podobnych pomiarów, przy tem samem świetle, dla 2-ej, 3-ej, 4-ej.... ciemnej linii, odpowiadających różnicy, równej 3, 5, 7...., jednem słowem nieparzystej liczbie pół-fal—możemy pierwszy otrzymany rezultat ściśle skontrolować. Fresnel zrobił to dla światła, które przeszło przez szkło czerwone i znalazł, że długość fali dla takiego światła wynosi 638 milionowych części jednego milimetra. W jednym z następnych rozdziałów poznamy dokładniejszą metodę mierzenia długości fali dla różnych promieni, tymczasem zaś możemy powziąć wyobrażenie o niezmiernej małości tych fal z faktu, że na przestrzeni jednego milimetra mieści się ich 1315 dla skrajnych czerwonych, 1698 dla żółtych promieni od sodu i 2542 dla skrajnych fioletowych. Widzimy tedy, że im *dane promienie są bardziej łamliwe, tem odpowiadające im fale są krótsze*, coraz bowiem większa ich ilość mieści się na tej samej długości. Z nauki o dźwięku wiemy już, że wszystkie tony, wysokie czy nizkie, silne lub słabe, rozchodzą się w danym środku z jednakową prędkością, która w powietrzu wynosi 340 metrów na sekundę. Wiadomo nam również, że podczas jednej całkowitej oscylacyi dźwięk przenosi się na długość jednej fali (str. 284) tak, że ilość drgań w ciągu sekundy, czyli t. zw. częstość drgań, odpowiadająca pewnemu tonowi, daje nam zarazem liczbę fal, wytworzonych w ciągu tego czasu na pewnej przestrzeni. Otrzymujemy tedy długość fali w powietrzu dla danego tonu, jeżeli powyższą prędkość rozcho-

dzenia się dźwięku dzielimy przez odpowiednią częstość drgań. W podobny sposób można dla każdego falowego ruchu znaleźć długość jego fali, jeżeli tylko wiadomą jest szybkość rozprzestrzeniania się tego ruchu oraz odnośna częstość drgań i naodwrót: mając długość fali, można także obliczyć częstość drgań. Otóż prędkość światła wynosi, jak wiemy, w okrągłej liczbie 300000 kilometrów na sekundę; pewne obserwacye, robione przez Arago, również jak i teoretyczne wywody, oparte na teoryi ruchu falowego, każą nam przyjąć, że prędkość ta w swobodnym eterze wszechświata jest jednakowa dla promieni wszelkich barw i natężenia. Dzieląc tedy liczbę, wyrażającą tę prędkość przez podaną wyżej długość fali dla promieni np. skrajnie czerwonych, otrzymujemy około 395 bilionów drgań, wykonywanych w ciągu sekundy przez cząstkę eteru wtedy, gdy przeprowadza ona światło rzeczonej barwy. Dla żółtego promienia od sodu częstość drgań wynosi jeszcze więcej, albowiem 509 bilionów, skrajnie zaś fioletowym promieniom odpowiada 763 bilionów drgań na sekundę. Czytelnik zauważył tutaj zapewne związek, zachodzący pomiędzy długością fali dla pewnej barwy, a odnośną częstością drgań: promieniom mniej łamliwym (czerwonym) odpowiada mniejsza częstość drgań i większa długość fali, bardziej zaś łamliwym (fioletowym)—znaczniejsza daleko częstość drgań przy mniejszej za to długości fali. Rzecz oczywista bowiem, że im więcej drgań cząstka eteru wykonywa w ciągu sekundy, tem drgania te muszą być szybsze, czyli że każde z nich trwa przez krótszą część sekundy; ponieważ podczas jednej całkowitej oscylacyi ruch przenosi się na długość jednej fali, ta ostatnia musi być mniejszą, gdy oscylacye prędzej się odbywają. Podobnie jak przy dźwięku *wysokość tonu* zależy od częstości drgań, tak przy świetle od tego samego zależy *barwa* promienia. Gdy np. widełki strojowe wykonywują 440 drgań w ciągu sekundy, ucho, do którego drgania te dochodzą, odczuwa je jako ton *A;* gdy zaś w ciągu takiego samego czasu fala, wychodząca ze źródła świetlnego, uderzy o oko np. 509 bilionów razy, to ostatnie odbierze wrażenie barwy żółtej. Widmo świetlne można porównać do gamy; w istocie przedstawia ono gamę barw, z któ-

rych najniższą jest skrajnie czerwona, najwyższą zaś—skrajnie fioletowa. Promienie ultra-czerwone odznaczają się zbyt małą częstością drgań, ażeby mogły wywrzeć na oko wrażenie światła; również i ultra-fioletowe o zbyt wielkiej częstości drgań, nie mogą być przez nie odczute.

Rozważmy obecnie ze stanowiska teoryi falowania inną jeszcze cechę promienia świetlnego, a mianowicie jego *natężenie*. Kula metalowa, przymocowana do dolnego końca pionowego spiralnie skręconego drutu, będąc wyprowadzona w kierunku pionowym z pierwotnego położenia, a następnie puszczona, powraca wskutek sprężystości drutu do tegoż położenia z siłą, równą tej, która poprzednio naruszyła równowagę, tutaj jednak nie zatrzymuje się, lecz wykonywa drgania ku górze i ku dołowi, dające się z łatwością liczyć. Otóż jeżeli w podobnem doświadczeniu kula zostanie ściągniętą najprzód na 2 centymetry, następnie na 4, później na 6 i t. d. i w każdym z tych wypadków zostanie puszczona, będzie ona w ciągu jednej oscylacyi przebywała drogi odpowiednio coraz większe. Droga kuli od jednego skrajnego jej położenia do drugiego zowie się *amplitudą*, powiemy więc, że amplituda drgań w drugim wypadku jest 2 razy większa, w trzecim zaś 3 razy większa, niż w pierwszym. Pomimo to, częstość drgań kuli w każdym z tych wypadków jest jednakowa, a więc zarówno dłuższą, jak i krótszą drogę przebywa ona w tym samym czasie; dzieje się zaś tak dlatego, że przy dwa lub trzy razy większem obniżeniu kuli, ujawnia się dwa albo trzy razy większa siła sprężystości drutu. W ogóle częstość drgań nie zależy od zewnętrznego impulsu, lecz od budowy samego drgającego ciała; impuls ten wpływa tylko na amplitudę drgań, a w miarę jej wzrastania ton staje się silniejszy. Cząstka materyi wyprowadzona z położenia równowagi, powraca doń z siłą, natężenie której zmienia się w prostym stosunku do odległości, na jaką ta cząstka oddaliła się od tegoż położenia. Wskutek tego prędkość jej ruchu drgającego wzrasta także proporcyonalnie do tej samej odległości, czyli że drgania odbywają się tem szybciej im większą jest ich amplituda; dlatego właśnie *czas trwania jednej oscylacyi jest stały, niezależny od zmian amplitudy.*

Nadmieniliśmy już w księdze o dźwięku, że mechaniczne działanie kuli, uderzającej o tarczę, jest wprost proporcyonalne do masy kuli i do kwadratu z jej prędkości (str. 270). To samo stosuje się do cząstek powietrza, uderzających o błonę bębenkową ucha, jak i cząstek eteru, uderzających o oko. Prędkość ruchu drgającego tych ostatnich dosięga maximum w chwili największego odchylenia z położenia równowagi. Otóż natężenie fali świetlnej jest wprost proporcyonalne do kwadratu z tej maximalnej prędkości. Ponieważ zaś, według powyższego, prędkość ta wzrasta w miarę powiększania się amplitudy, wynika z tego, że *natężenie światła jest wprost proporcyonalne do kwadratu z amplitudy drgań.*

Widzimy tedy, że, podobnie jak przy drganiach dźwiękowych powietrza i ciał, wydających dźwięk (str. 272), tak i przy drganiach świetlnych, amplituda oscylacyi określa *natężenie* dźwięku, względnie światła, zaś peryod (t. j. czas trwania) oscylacyi, albo też częstość drgań warunkuje *wysokość* tonu, względnie *barwę* promienia. Wspomniany przez nas fakt, że peryod oscylacyi jest niezależny od jej amplitudy, tłómaczy nam, dlaczego jeden i ten sam ton lub barwa mogą posiadać rozmaite natężenie.

Wreszcie zważywszy, że światło rozchodzi się od ciała świecącego na wszystkie strony, podobnie jak dźwięk od ciała dźwięczącego, pod postacią współśrodkowych kulistych fal, zrozumiemy, że dla tych samych powodów, jakie wyłuszczyliśmy już w nauce o dźwięku (patrz str. 272), natężenie światła jest odwrotnie proporcyonalne do kwadratu z odległości od ciała świecącego. Prawo to, zyskane na drodze empirycznej, okazuje się więc z drugiej strony wynikiem teoryi falowania światła.

§ 3. Zasada Huyghens'a.

W poprzednich dwóch §§ staraliśmy się wyłożyć teoryę falowania światła w sposób możliwie najprostszy i najbardziej przystępny dla nieobznajmionego z nią jeszcze czytelnika. Obecnie wszakże musimy wykład ten nieco zmodyfikować, albowiem

w takiej formie, w jakiej go tam podaliśmy, nie mógłby nam służyć do zupełnie dokładnego wyjaśnienia znanych nam już zjawisk i praw z zakresu optyki, również jak i zjawisk, które następnie jeszcze poznamy.

Już w r. 1664 Hooke wygłosił pogląd, że światło polega na drgającym ruchu jakiegoś sprężystego środka, rozprzestrzeniającym się w kierunku prostych linii, które wychodzą ze wspólnego punktu na kształt promieni kuli. Uczonemu temu, przed innymi, należy się zasługa jasnego sformułowania tej zasady teoryi falowania. Nie mógł on jednak na tej podstawie wytłómaczyć zjawiska załamania światła, do tego bowiem brak mu było jeszcze pewnych uzupełnień, które odkrył dopiero współcześnie z nim żyjący Huyghens. Od niego też noszą one ogólną nazwę *zasady Huyghens'a*. Zobaczmy tedy, na czem polega ta ostatnia.

Wiemy już, że każda drgająca cząstka eteru powtarza ruch cząstki, pierwotnie wprawionej w drgania przez ciało świecące; oprócz tego, każda z nich znajduje się względem otaczających ją cząstek w takim samym stosunku, w jakim ta najpierw pobudzona cząstka pozostaje względem swych najbliższych sąsiadek. Jeżeli przeto wokoło tej pierwszej cząstki powstaje system fal, to tworzy się on także wokoło drugiej, trzeciej, czwartej i t. d., czyli innemi słowy *każda drgająca cząstka stanowi punkt wyjścia dla oddzielnego systemu fal.* Wszystkie te jednocześnie istniejące oddzielne systemy, któreby można nazwać składowemi, w każdej chwili krzyżują się z sobą według znanego nam już prawa nakładania się fal i wytwarzają jeden system wypadkowy albo główny, przebiegający w tej samej chwili dany sprężysty środek. Wyobraźmy sobie, że wokoło punktu A (fig. 356, str. 559), będącego źródłem ruchu, wytworzyła się kulista fala, której część tylko $B\ C$ przedstawiona jest na rysunku. Wszystkie cząstki, leżące na jej powierzchni, stanowią punkty wyjścia dla nowych, jednakowo wielkich fal składowych, które wyobrażone są pod postacią małych łuków; gdy fale te po pewnym czasie dochodzą, w jednakowych fazach oscylacyi, do miejsca $B'\ C'$, panuje tutaj taki sam stan ruchu drgającego, jak przedtem na powierzchni $B\ C$, tylko że ruch ten nie przeniósł się jako jedyna fala z $B\ C$

na *B' C'*, lecz w postaci fal składowych (wychodzących z oddzielnych punktów leżących na linii *B C*). Rezultat wszakże, pod względem kształtu powierzchni *B' C'*, oraz prędkości udzielenia się ruchu, jest ten sam, jak gdyby ruch drgający rozprzestrzenił się jako jedna fala od punktu *A* aż do *B' C'*. Gdy falowy ruch przenosi się bez przeszkody, wszystkie owe składowe fale zlewają się w jedną główną tak, że one same oddzielnie niczem nie ujawniają swej obecności. Lecz gdy np. fala wychodząca z *A*, przechodzi przez jakiś otwór *B C*, znajdujący się dajmy na to w ekranie, wtedy tylko część jej, zawarta pomiędzy promieniami *A B* i *A C*, rozprzestrzenia się swobodnie i fale składowe, wychodzące z punktów, położonych pomiędzy *B* i *C*, zlewają się w główną falę *B' C'*. Z krańcowych zaś punktów *B* i *C* wychodzą fale składowe *B' b* i *C' c*, które częściowo pozostają odosobnione i przenoszą ruch, wprawdzie stosunkowo bardzo słaby, do przestrzeni *B' B S* i *C' C S*, ominiętych przez falę główną. Wkrótce poznamy zjawiska, powstające wskutek takiego wyosabniania się fal składowych.

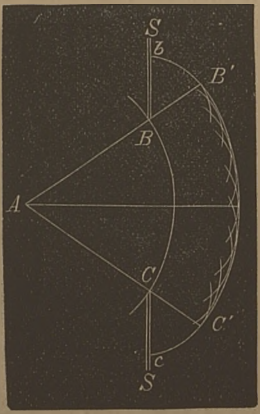


Fig. 356. Zasada Huyghens'a.

Widzimy tedy, że fale składowe rozprzestrzeniają się pod postacią kul współśrodkowych wokoło punktu świecącego zupełnie tak, jak gdyby rozchodziła się zeń tylko jedna główna fala. Cóż tedy oznacza wyrażenie: prostolinijny kierunek światła? Nie rozchodzi się ono wzdłuż jednej prostej linii, cząstki bowiem na niej leżące wpływają w sposób wyżej opisany na te, które znajdują się na innych liniach; właściwie więc i *pojedyńczy promień świetlny nie istnieje*, gdyż nawet na nader nieznaczną część falowej powierzchni składa się bardzo wiele fal, tworzących razem wiązkę. Pod promieniem świetlnym będziemy odtąd rozumieli kierunek, w jakim rozchodzi się ruch od tego małego elementu powierzchni falowej, do którego wiązka owa należy. W każdym środku, w którym światlo rozprzestrzenia

się na wszystkie strony z jednakową prędkością, promień jest prostopadły do odpowiadającego mu elementu powierzchni falowej. Im bliżej punktu świecącego, tem wyraźniejszą przytem jest wypukłość tej ostatniej, przeciwnie im dalej, tembardziej staje się ona płaską tak, że na znacznej odeń odległości niewielką część powierzchni falowej możemy w przybliżeniu uważać za płaską (podobnie jak małą część nader wielkiej kuli), odpowiadające jej zaś promienie za równoległe pomiędzy sobą.

Poznawszy zasadę Huyghens'a, zastosujmy ją obecnie do wypadku, gdy fala świetlna, rozprzestrzeniająca się w powietrzu, napotyka inny, optycznie gęstszy środek, gdy pada np. na spokojny poziom wody. Niechaj *a b* (fig. 357) przedstawia płaską część powierzchni falowej, zaś *A a b' B* odpowiadającą jej wiązkę równoległych promieni. Gdy fala ta biegnie ku powierzchni *MN* wody, cząstki eteru, znajdujące się pomiędzy *a* i *b'*, zostają jedna po drugiej wprawione w ruch i wysyłają fale składowe, które rozchodzą się po części w powietrzu, po części zaś w wodzie.

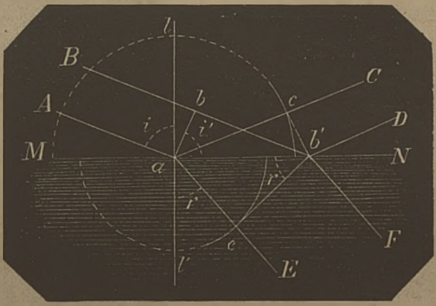


Fig. 357. Objaśnienie praw odbicia i załamania światła.

Rozpatrzmy najprzód te pierwsze. W chwili gdy cząstka *b'* ma rozpocząć swe drgania, t. j. gdy główna fala przeniosła się na odległość *b b'*, wokoło cząstki *a* utworzyła się w powietrzu fala składowa, której promień *a c* jest oczywiście równy *b b'*; fala ta przedstawiona jest pod postacią półkola, zakreślonego z punktu *a*. Pozostałe punkty, leżące pomiędzy *a* i *b'*, dają w tymże czasie początek podobnym falom składowym, lecz o promieniach tem mniejszych, im dany punkt leży bliżej punktu *b'*, ruch którego jeszcze się nie rozpoczął. Jeżeli z *b'* poprowadzimy prostą linię *b' c*, styczną do półkoła *b' c M*, wyobrażającego pierwszą falę składową, to linia ta będzie także styczną do wszystkich półkól,

przedstawiających składowe fale, wyszłe z punktów, leżących między a i b' tak, że linia ta wyobraża płaską część fali głównej, która z nich wszystkich się utworzyła. Fala b' c, *odbita* od powierzchni wody i rozprzestrzeniająca się w kierunku odpowiadającej jej wiązki a C b' D równoległych promieni, tworzy z tą powierzchnią kąt c b' a, równy (jak to bardzo łatwo dowieść można geometrycznie) kątowi b a b', jaki z poziomem wody daje fala *padająca* a b. Jeżeli z punktu a wystawimy do poziomu M N normalną a l, wtedy kąt A a l (i), jaki tworzy z nią promień padający, jest równy kątowi nachylenia b a b (i') odpowiadającej fali a b względem tegoż poziomu, odjąwszy bowiem od kąta prostego kąt padania (i), lub kąt nachylenia fali (i'), otrzymujemy w jednym i w drugim razie wielkość jednakową, co dowodzi, że $i = i'$. To samo zupełnie dotyczy promienia odbitego a C i fali odbitej b' c. Ponieważ fala padająca i odbita są zawsze jednakowo nachylone do powierzchni wody, wynika z tego, że i promień padający oraz odbity są zawsze równo nachylone względem normalnej do tejże powierzchni w punkcie padania. Widzimy tedy, że prawo, orzekające równość kątów padania i odbicia światła, stanowi konieczny wynik teoryi undulacyjnej. Rozpatrzmy obecnie te części fal składowych, które przenikają do wody. Podczas gdy główna fala przenosi się w powietrzu od b do b', wokoło cząstki a tworzy się w wodzie fala składowa, której promień a e tak się ma do promienia a c (lub b b'), jak prędkość światła w wodzie do prędkości tegoż w powietrzu. Ponieważ, jak wykazały doświadczenia Fizeau i Foucault'a, pierwsza jest mniejsza od drugiej, to i a e jest mniejszy od a c. Linia prosta b' e, styczna do półkola, przedstawiającego pierwszą falę składową w wodzie, jest zarazem styczną do półkół, wyobrażających wszystkie inne fale składowe w wodzie, wyszłe z punktów, leżących między a i b'. Linia ta przedstawia tedy płaską falę główną, która rozchodzi się w wodzie w kierunku wiązki a E b' F prostopadłych do niej i równoległych pomiędzy sobą promieni. Widzimy, że te ostatnie tworzą z normalną a l' kąt r, różny od kąta padania i, a przytem mniejszy od niego, czyli że promień A a uległ w wodzie załamaniu i zbliżył się do normalnej.

Tak samo i fala główna b' e w wodzie nachylona jest do powierzchni tejże pod kątem e b' a, równym kątowi r. Jeżeli dowolnie wybraną przez nas długość a b' przyjmiemy za jedność, wtedy b b' stanowi wstawę kąta padania i, zaś a e wstawę kąta załamania r, są to bowiem prostopadłe, spuszczone z końca jednego boku odpowiedniego kąta na przedłużenie drugiego jego boku; z trygonometryi zaś wiadomo, że przy promieniu równym jedności ($a\,b'=1$) prostopadła taka jest zarazem wstawą danego kąta. Stosunek długości b b' do a e jest takiż sam, co i prędkości światła w powietrzu do prędkości jego w wodzie, ten ostatni zaś stosunek jest niezmienny, bez względu na kąt padania promieni świetlnych. *Prawo tedy o stałości stosunku wstawy kąta padania do wstawy kąta załamania* okazuje się również koniecznym wynikiem teoryi undulacyjnej; dopiero w jej świetle staje się zupełnie jasnem. Mianowicie według tej teoryi, spółczynnik załamania dla dwóch danych środków jestto nic innego, jak stosunek prędkości, z jakiemi rozprzestrzenia się w nich światło. Spółczynnik np. załamania dla powietrza i wody, równy $^4/_3$, powiada nam tedy, że podczas gdy światło w pierwszym z tych środków przebywa w okrągłej liczbie 300000 kilometrów na sekundę, w drugim—o $^1/_4$ mniej, t. j. tylko 225000 kilom. Wniosek z teoryi falowania, że światło w środku silniej załamującym rozchodzi się wolniej, niż w słabiej załamującym, potwierdziły, jak już wiemy, doświadczenia Fizeau i Foucault'a. Co się tyczy samej owej różnicy w prędkościach światła w środkach rozmaicie załamujących, to teorya falowania tłómaczy ją przypuszczeniem, iż gęstość eteru, zawartego w ciałach stałych i płynnych, jest większa od gęstości jego w powietrzu, albo też w przestworach wszechświatowych. W razie gdy fala świetlna przechodzi z jednego optycznego środka do innego, drgający ruch eteru udziela się eterowi, mniej albo więcej gęstemu i dlatego też zajść musi pewna zmiana w dotychczasowym sposobie rozprzestrzeniania się fali. Ażeby dobrze zrozumieć rodzaj tej zmiany, zaczerpnijmy z mechaniki pewne dane co do praw uderzania o siebie ciał sprężystych. Przypuśćmy, że dwie kule słoniowe *niejednakowej wielkości* zawieszone są na nitkach jedna obok drugiej tak,

że dotykają się wzajemnie. Jeżeli mniejszą z nich uniesiemy nieco do góry i puścimy, wtedy spadając uderzy ona o większą, przyczem zobaczymy, że ta ostatnia poruszy się w kierunku uderzenia, mniejsza zaś kula odskoczy napowrót, t. j. w stronę przeciwną kierunkowi spadku. Gdy zaś uczynimy to samo z większą kulą, wtedy ta, uderzywszy o mniejszą, porusza ją naprzód, lecz i sama także podąża za nią, jakkolwiek porusza się ona w tę stronę z mniejszą nieco prędkością, niż jak gdyby tej drugiej kuli nie napotkała. W obu tedy razach kula uderzająca udziela część swego ruchu kuli uderzanej, lecz sama nie pozostaje przytem w spoczynku. Rzecz się zmienia, gdy kule posiadają *wielkość jednakową*, wtedy bowiem uderzająca zatrzymuje się, cały swój ruch udzielając uderzanej, która biegnie w pierwotnym kierunku tamtej. Prawa te można także zastosować do przenoszenia się drgającego ruchu eteru świetlnego z danej warstwy na drugą, znajdującą się w spoczynku. Jeżeli obydwie posiadają jednakową gęstość, a więc także, gdy masy jednakowych ich objętości są równe, wtedy druga warstwa przejmuje całkowicie ruch pierwszej, ta ostatnia zaś pozostaje w spoczynku, dopóki nie otrzyma nowego impulsu od strony źródła światła. Z tego wynika, że w jednym i tym samym, wszędzie jednakowo optycznie gęstym środku, nie mogą powstać cofające się napowrót fale składowe; zgodnie z tem widzimy, że w środku takim światło rozprzestrzenia się zawsze tylko naprzód, a nie wstecz. Przeciwnie, gdy dwie owe warstwy różnią się pod względem swej gęstości, a więc gdy jednakowe ich objętości zawierają nierówne masy, wtedy warstwa rzadsza uderzająca udziela wprawdzie ruch swój uderzanej, lecz i sama zachowuje także część ruchu, tylko że kierunek tegoż staje się wręcz przeciwnym (podobnie jak z małą kulą, która spadając, uderza o większą, popycha ją naprzód, poczem sama cofa się w tył), wskutek czego powstają powrotne fale składowe, dające razem odbitą falę główną. Widzimy tedy, że zjawisko odbicia się światła może mieć miejsce tylko wtedy, gdy fala świetlna uderza o powierzchnię, odgraniczającą dwa środki o niejednakowej gęstości.

§ 4. Rozszczepienie i pochłanianie światła w obec teoryi falowania.

Prędkość światła dla różnych jego rodzajów jest jednakowa tylko w swobodnym eterze, w eterze zaś, zawartym w ciałach, t. j. w przestrzeniach pomiędzy ich cząstkami, promienie świetlne o rozmaitej barwie rozprzestrzeniają się z szybkością niejednakową. Wpływ, wywierany przez cząstki danego ciala na przebiegające przezeń fale świetlne, zależy oczywiście od natury tegoż ciała. Wiemy np., że w wielu substancyach bezbarwnych i przezroczystych, jak woda lub szkło, promienie o większej częstości drgań zostają silniej odchylone od pierwotnego kierunku, aniżeli promienie o mniejszej częstości drgań i to właśnie stanowi przyczynę rozszczepiania się światła złożonego przy przejściu jego przez pryzmat z takiej substancyi. Ponieważ, jak widzieliśmy w poprzednim paragrafie, spółczynnik załamania dla dwóch danych środków, wyraża tylko stosunek prędkości światła w tych ostatnich, to *niejednakowe załamanie różnych promieni świadczy o mniejszej albo większej szybkości ich rozprzestrzeniania się w załamującym środku.* Te promienie, które się najsilniej załamują, ulegają oczywiście największej zwłoce przy swem rozchodzeniu się, dla najsłabiej zaś załamanych opóźnienie w prędkości jest najmniejsze. Takie ciała stałe lub ciekłe, jak np. wspomniane już szkło albo woda, załamują najsilniej promienie fioletowe, najsłabiej zaś czerwone i dlatego pryzmaty szklane lub wodne dają nam zwykłe widma, poczynające się od czerwieni i kończące się fioletem. Ciała zaś lotne w ogóle, a więc także powietrze atmosferyczne, powodują tak nieznaczne rozszczepienie przechodzącego przez nie światła, że można przyjąć, iż prędkość światła jest w nich dla wszystkich barw jednakowa, podobnie jak w swobodnym eterze. Spółczynnik np. załamania dla tego ostatniego i powietrza przy 0^0 i ciśnieniu 760 milim. równa się stosunkowi 1,000294 do 1.

Bardzo ciekawym jest wpływ cząstek niektórych barwnych substancyj na prędkość przechodzącego przez nie światła. Jeżeli szklany wydrążony pryzmat napełnimy alkoholowym roztworem

fuksyny (barwnik anilinowy) i będziemy przezeń patrzyli na silnie oświeconą szczelinę, zobaczymy widmo, w którem *promienie niebieskie i fiotetowe są mniej załamane, niż czerwone i żółte*, innemi słowy to, co zwykle widzimy na końcu widma, w danym wypadku ujrzymy na jego początku, ten ostatni zaś będzie przesunięty ku środkowi. W fuksynie zatem promienie niebieskie i fioletowe rozprzestrzeniają się szybcej, niż czerwone i żółte. Zjawisko to, odkryte przez Christiansen'a i potwierdzone przez Kundt'a, który zbadał je na wielu innych pochłaniających światło barwnych substancyach, nosi nazwę *anormalnego rozszczepienia*. Pokazuje ono, że jedyną charakterystyczną cechą danego jednorodnego światła jest częstość drgań, inne bowiem jego właściwości, jak łamliwość lub długość fali ulegają zmianie. W istocie wiemy, że gdy promień np. czerwony, zielony lub jakikolwiek jednorodny, przechodzi z powietrza do wody albo szkła, barwa jego od tego się nie zmienia, częstość drgań pozostaje ta sama. Długość natomiast fali w wodzie oczywiście jest inna, niż w powietrzu, skoro bowiem prędkość światła w tem ostatniem jest większa niż w pierwszej, a długość fali w ogóle równa się ilorazowi z prędkości przenoszenia się ruchu drgającego przez częstość drgań, to gdy ta ostatnia jest niezmienną, fala świetlna, odpowiadająca danej barwie, musi być w wodzie krótsza niż w powietrzu (w stosunku $^3/_4$ do 1).

Nasze wrażenia barw są czysto subjektywne, zależą one tylko od ilości fal świetlnych, uderzających w ciągu jednostki czasu o siatkówkę oka tak, że gdy liczba tych uderzeń zmienia się, wtedy odbieramy wrażenie innej barwy. Otóż czy istnieją warunki, przy których jedno i to samo ciało świecące wysyłałoby do nas światło o zmieniającej się barwie? Przypomnijmy sobie zasadę Doepplera (str. 285), głoszącą, że przy jednakowej liczbie drgań ciała dźwięczącego słyszymy ton wyższy albo niższy, zależnie od tego, czy ciało to zbliża się do nas lub oddala, albo też czy my zbliżamy się doń lub oddalamy. Ta sama zasada stosuje się także do światła. Jeżeli wyobrazimy sobie, że z dalekich przestworów wszechświata zbliża się ku nam z dostateczną prędkością jakieś ciało, wysyłające np. żółte światło, wtedy

barwa jego wyda nam się zielonawą, albowiem oko nasze otrzymuje w ciągu sekundy większą liczbę uderzeń, niż w razie, gdyby ciało owo znajdowało się w spoczynku. Przeciwnie przy jego oddalaniu się, liczba fal, dochodzących do oka w przeciągu sekundy zmniejszałaby się i żółta barwa wydawałaby się czerwonawą. Gdyby promienie od tego poruszającego się ciała padały na szklany pryzmat, ulegałyby w nim większemu albo mniejszemu załamaniu. W spektroskopie skierowanym na to ciało, odpowiadająca mu jasna widmowa linia przesuwałaby się w stronę zieleni lub czerwieni, zależnie od tego, czy zbliżałoby się ono ku nam albo oddalało. Podobnie rzecz się ma także z ciemnemi liniami w widmach gwiazd, oddalających się albo zbliżających ku nam. Z przesunięcia się tych linii w jedną lub w drugą stronę widma oraz z wielkości tego zboczenia można wnosić o kierunku ruchu gwiazdy i o jej prędkości. W ten sposób podczas jednej obserwacyi Syryusza zauważono, iż gwiazda ta oddalała się od naszego systemu słonecznego z prędkością 48 kilometrów na sekundę. Wprawdzie i lunety pozwoliły astronomom odkryć własny ruch wielu gwiazd stałych, lecz za pomocą tych przyrządów można dostrzedz tylko zmianę miejsca w kierunku prostopadłym do linii widzenia. Spektroskop zaś oddaje pod tym względem tę nieocenioną przysługę, że ujawnia także ruch gwiazdy w kierunku samej linii widzenia. Lockyer obserwował przesunięcia ciemnej linii *F* w widmie słonecznem i jasnej linii *F* w widmie atmosfery słonecznej (chromosfery), a obserwacye te pozwoliły mu dokładnie obliczyć prędkość, z jaką rozżarzony wodór, składający chromosferę, wznosi się i opuszcza albo też wiruje w szalonym pędzie. Zmiana w liczbie dochodzących nas fal świetlnych, odpowiadająca owym przesunięciom, wskazuje prędkość 50 do 60 kilometrów na sekundę; rachunek zaś, zrobiony na podstawie najsilniejszego zboczenia linii, dał w rezultacie prędkość 190 kilometrów. Najgwałtowniejsze orkany w atmosferze ziemskiej, szybkość których dochodzi najwyżej do 45 metrów na sekundę, są chyba niewinnym wiaterkiem w obec tych straszliwych orkanów w atmosferze słońca ([1]).

([1]) Lomel, l. c.

Dotychczas, mówiąc o teoryi falowania światła, poświęcaliśmy uwagę naszą nie tyle źródłu tegoż, ile sposobom jego rozprzestrzeniania się, obecnie zaś chcemy zająć się nieco zbadaniem procesu, zachodzącego, według tejże teoryi, w samem ciele świecącem. Otóż przyjmują obecnie, że dane ciało staje się źródłem światła—zobaczymy w następnej księdze, że stosuje się to także do ciepła—wskutek nadzwyczaj szybkiego ruchu drgającego jego cząstek, który to ruch za pośrednictwem eteru odczuwamy jako wrażenie ciepła lub światła, zależnie od częstości drgań. Podobnie jednak, jak ton, wydawany przez drgającą strunę, zależy od jej długości, natężenia, grubości i materyału z którego jest zrobiona, tak też i drgania oddzielnych cząstek ciała świecącego uwarunkowane są ich budową i naturą chemiczną. Można powiedzieć, że cząstki te nastrojone są na pewną barwę—tę właśnie, którą świeci dane ciało; dlatego też charakterystyczną cechą wielu ciał są jasne linie w ich widmie. Musimy wszakże nadmienić, że w *ciałach stałych*, w których spójność bywa nader znaczna, drgający ruch jest bardzo przez nią ograniczony tak, że żadna z cząstek nie może się oddalić po za pewną odległość od położenia równowagi, około którego wykonywa swe oscylacye. Te ostatnie w danym wypadku nie zależą od chemicznej natury ciała; częstość zaś ich nie jest stałą i jednakową dla wszystkich cząstek, lecz w danej chwili może być najrozmaitszą. W taki sposób tłómaczy się, dlaczego ciała stałe, niezależnie od chemicznego swego składu, dają przy ogrzewaniu widmo *ciągłe*, które przy względnie nizkiej temperaturze zawiera tylko niewidzialne ultra-czerwone promienie, w miarę zaś jej podwyższania, pojawiają się także stopniowo promienie czerwone, żółte, zielone i t. d. aż do fioletowych, występujących przy temperaturze rozżarzenia do białości. Również i *ciała ciekłe*, w których spójność jest jeszcze dość znaczna, będąc doprowadzone do stanu rozżarzenia, dają widmo ciągłe. Oprócz jednak oscylacyj, wykonywanych przez cząstki ciał stałych oraz ciekłych i podlegających ograniczającemu wpływowi wspomnianej spójności pomiędzy ich cząstkami, wewnątrz każdej z tych ostatnich odbywają się nadto drgania drobniejszych jej składników, zależne

już tylko od względnego ich układu w cząstce i od ich natury chemicznej. Lecz jasne linie, odpowiadające tym drganiom, są niewidzialne dlatego, że znikają na jasnem również tle ciągłego widma, powstającego wskutek drgań całych cząstek. Dopiero gdy te ostatnie zostają uwolnione od wpływu spójności, t. j. gdy ciało przechodzi w stan lotny, występują charakterystyczne dlań jasne linie widmowe, zdradzające chemiczną jego budowę.

W księdze o dźwięku zatrzymaliśmy się nieco dłużej nad wpływem zgodności drgań dwóch lub więcej ciał oscylujących (str. 352) i zauważyliśmy tamże, że wpływ ten stosuje się również do drgań świetlnych. Gdy dana fala wprawia w ruch ciało, zdolne do wysyłania takich samych fal, wtedy udziela mu ona część swego ruchu i dlatego przechodzi osłabiona, każda zaś inna fala biegnie dalej niezmieniona. Wyobraźmy sobie przestrzeń wypełnioną stroikami lub strunami, naciągniętemi we wszystkich kierunkach i nie interferującemi ze sobą; wszystkie one nastrojone są na jeden i ten sam ton tak, że będąc wprawione w drgania, wzmacniają się wzajemnie i wydają ten właśnie ton. Gdy zaś przestrzeń nie stanowi źródła dźwięku, lecz tylko służy jako środek do przeprowadzania go z innego źródła, wtedy okazuje się ona dziwnie, że tak powiemy, nieprzezroczystą dla tego jedynie tonu, który przedtem zdolna była wydawać. Wszelkie tony, wyjąwszy ten, na który nastrojone są stroiki lub struny, wydawane przez silny instrument z jednej strony przestrzeni, słyszane są z drugiej z taką prawie intensywnością, jak gdyby tych stroików lub strun wcale nie było. Lecz gdy instrument wydaje ton, właściwy tym ostatnim, wtedy pochłaniają one stopniowo odnośny ruch drgający i same poczynają drgać; jeżeli przytem liczba ich jest dostatecznie wielka, pochłonięcie to jest zupełne i dany ton wcale nie przechodzi na drugą stronę, wyjąwszy tę jego część, którą one wysyłają. Przypuśćmy obecnie, że mamy ciało, znajdujące się w tak szybkim drgającym ruchu, iż nie wydaje już dźwięku, lecz wysyła światło pewnej barwy. Otóż drugie ciało tego samego gatunku co pierwsze, będzie najbardziej zdolne do pochłonięcia tego światła, albowiem dwie części jednej i tej samej materyi, znajdujące się w jednakowych wa-

runkach, drgają według jednakowych praw. Płomień zawierający np. rozżarzone cząstki sodu, można porównać do owej przestrzeni, wypełnionej stroikami, nastrojonemi na pewien specyalny ton; w istocie cząstki te są zdolne tylko do oscylacyj, odpowiadających barwie żółtej i łatwo zrozumieć, dlaczego pochłaniają one te właśnie żółte promienie, osłabiając je, albo nawet wcale nie przepuszczając takowych.

Taką jest, w kilku słowach wyrażona, zasada pochłaniania ruchu drgającego, do której Stokes doszedł przeszło dwadzieścia lat temu ([1]). Sprowadza ona, jak widzimy, do jednego ogólnego punktu widzenia zjawiska pochłaniania dźwięku, światła, a także, jak o tem następnie się przekonamy, ciepła promienistego. W końcu należy dodać jeszcze, że pochłonięty ruch nie znika, lecz przenosi się w całości na ciało pochłaniające. Jedna część pochłoniętego ruchu eteru zużywa się na przezwyciężenie spójności pomiędzy cząstkami, które odsuwają się od siebie, albo nawet zupełnie oddzielają: ciało przechodzi ze stanu stałego w ciekły, z ciekłego w lotny i wreszcie, gdy same cząstki rozpadają się na jeszcze drobniejsze swe składniki, ulega chemicznemu rozkładowi. Na tem ostatniem działaniu pochłoniętych fal świetlnych opiera się, jak wiemy, rozkład niektórych substancyj, używanych w fotografii. Druga zaś część pochłoniętego ruchu wprawia cząstki w drgania, albo też już istniejące wzmacnia, przez co cząstki te stają się same źródłem nowych fal eteru, objawiających się dla nas jako ciepło lub światło, jak np. podczas zjawisk żarzenia się, fluorescencyi lub fosforescencyi.

§ 5. Uginanie się światła (dyfrakcya).

Gdy Newton powtórzył i pod niektóremi względami odmienił doświadczenia Grimaldi'ego nad powiększaniem się cienia wązkich przedmiotów, jak włosów, nici, igieł (str. 542), przekonał się wkrótce, że zboczenie promieni świetlnych nie pochodziło, jak sądzono z początku, od załamania się ich jakoby w cienkiej warstwie zgęszczonego powietrza, zbierającego się na po-

([1]) Tait, Progrès récents de la physique.

wierzchni tychże przedmiotów. Widział on, że powstawanie linij było zupełnie niezależne od natury substancyj, poddawanych doświadczeniu: czy to był metal, kamień, szkło, drzewo, lód, zawsze pojawiały się grupy linij, mające określone barwy i idące w pewnym porządku. Zauważył również, że rozmaite jednorodne barwy widma dawały linie niejednakowej szerokości. Ze wszystkich tych faktów Newton wyprowadził ten tylko wniosek, że promienie świetlne, przechodząc mimo krawędzi ciał, ulegają zboczeniu, istotnego jednak objaśnienia, jak wiemy, nie mógł znaleść.

Liczne doświadczenia, urządzane obecnie w celu zbadania tego zjawiska, można podzielić na dwa szeregi. Pierwszy obejmuje te, w których światło przechodzi mimo krawędzi prostolinijnych, a więc np. przez jednę albo więcej bardzo wązkich szczelin o brzegach równoległych; w doświadczeniach zaś drugiego rodzaju przepuszcza się światło przez jeden lub kilka maleńkich otworów trójkątnych, czworokątnych lub okrągłych. Jeżeli przez ciasną pionową szczelinę przepuścimy wiązkę promieni słonecznych i rzucimy je na ekran, dość daleko od szczeliny umieszczony, zobaczymy na nim oprócz białej jasnej linii, utworzonej pośrodku przez promienie, które doszły doń w kierunku prostolinijnym, dwa boczne szeregi kolejno ciemnych i jasnych linij, podobnych do linij interferencyjnych w doświadczeniu Fresnel'a (patrz fig. 355, str. 552). Zjawisko to dowodzi, że, jak chce zasada Huyghens'a, światło rozprzestrzenia się nietylko prosto—lecz także w pewnych specyalnych warunkach krzywolinijnie. Środkowa jasna linia oznacza to miejsce na ekranie, na które pada fala główna; tutaj właśnie wszystkie fale składowe, wychodzące z różnych punktów szczeliny, wspomagają się wzajemnie, przebywają bowiem drogi ściśle jednakowe. Wiemy jednak, że fala główna, przechodząc przez otwór, wysyła także fale składowe do przestrzeni, które właściwie powinny być zupełnie ciemne; te właśnie fale dają początek owym jasnym i ciemnym liniom w tych miejscach na ekranie, które znajdują się nie naprzeciwko szczeliny, lecz z boków jéj. Gdy padają one na taki bocznie położony punkt ekranu, mogą wspomagać lub też

zobojętniać się wzajemnie, zależnie od różnicy w drogach przebytych; w pierwszym razie tworzy się jasna, w drugim zaś ciemna linia. Fale składowe, odosobnione od fali głównej, tworzą promienie *ugięte*, samo zaś zjawisko zbaczania światła od kierunku prostolinijnego zowiemy *uginaniem* się czyli *dyfrakcyą*. Co do rezultatów użycia światła białego lub jednorodnego, t. j. co do barw linij, są one takie same, jak w doświadczeniach nad interferencyą (patrz str. 553). Podobnie, jak w tych ostatnich w miarę zmniejszania kąta pomiędzy zwierciadłami ścieśniamy coraz bardziej owe linie na ekranie, aż wreszcie nie można ich odróżnić, tak też w doświadczeniach nad uginaniem światła powtarza się to samo przy rozszerzaniu szczeliny, przez którą ono przechodzi. Gdy chcemy, ażeby odosabniające się fale składowe ujawniły dla nas swą obecność, musimy przepuszczać światło przez bardzo małe otwory, albowiem przy większych zjawisko uginania jest tak niewyraźne, iż nie możemy go dostrzedz. Gdy obserwuje się je przez lunetę, wtedy obraz dyfrakcyjny tworzy się w płaszczyznie ogniskowej objektywu i widziany jest przez okular w powiększeniu, dlatego też przy użyciu lunety otwory owe mogą być większe. Przyrząd, służący do tego celu, zaopatrzony jest od strony objektywu w obręcz drewnianą, na którą naciągnięta jest cynfolia z wyciętym w niej małym otworkiem. Obrazy widziane wtedy są najróżnorodniejsze, zależnie od kształtu tego ostatniego. Najprostszy widok przedstawia się wtedy, gdy otwór jest okrągły; mamy wtedy jasny jego okrągły obraz, otoczony naprzemian jasnemi i ciemnemi pierścieniami, które przy użyciu białego światła są lekko zabarwione. Jeżeli otwór przedstawia równoległobok (patrz tablicę p. t. „uginanie się światła przez małe otwory, prążki jednobarwne“), wtedy całe pole widzenia jest podzielone dwoma szeregami ciemnych linij na mnóstwo równoległoboków: pośrodku widać najjaśniejszy z nich, wokoło niego zaś mniej jasne, przyczem wszystkie razem tworzą pochylony krzyż. Na wymienionej tablicy, uwidoczniającéj uginanie się światła czerwonego, przedstawione są jeszcze inne wzory, otrzymane przy przepuszczaniu tegoż światła przez otwory najrozmaitsze, kształty których podane są obok każdego odpowiadającego im obrazu.

Nauka o dyfrakcyi czyli uginaniu się światła została znakomicie posunięta naprzód dzięki pracom Fraunhofer'a, któremu, jak wiemy, wiedza zawdzięcza zbadanie ciemnych linij w widmie słonecznem. Gdy znakomity ten fizyk obserwował obrazy, powstające przy przepuszczaniu światła przez liczne małe otwory, wpadł na pomysł zbadania także zjawisk, występujących wtedy, gdy przechodzi ono przez bardzo gęstą siatkę, utworzoną z nadzwyczaj delikatnych drucików lub nitek. Z początku Fraunhofer przygotowywał takie siatki, naciągając bardzo cienkie druty mosiężne na kwadratową ramę, przyczem równość odstępów pomiędzy pojedyńczemi drutami regulował za pomocą delikatnych szrub. Następnie chcąc otrzymać bardziej prawidłowe i subtelne odległości pomiędzy szczelinami, przepuszczającemi światło, pokrywał szklane tafelki cienkiemi blaszkami złota i na tych ostatnich nacinał owe szczeliny; wreszcie na samem szkle rył dyamentem kreski tak cienkie, że na długości jednego milimetra mieściło się ich więcej niż tysiąc, przyczem każda z nich stanowiła ciemny ekran dla światła swobodnie przechodzącego pomiędzy niemi. Oprócz siatek o liniach tylko wzajemnie równoległych, Fraunhofer używał jeszcze i takich, w których dwa układy linii przecinały się pod kątem prostym tak, że oczka miały formę kwadratową, dalej siatek o oczkach okrągłych i wielu innych, przez co otrzymał znaczną liczbę obrazów, gdzie ciemne i jasne prążki tworzyły zadziwiająco prawidłowy system. Obrazy te poddawał on starannej obserwacyi i pokazał, że są najzupełniej zgodne z teoretycznemi wnioskami.

Tablica zatytułowana: „uginanie się światła przez siatkę, prążki wielobarwne", pokazuje obrazy otrzymane przy użyciu światła białego. Gdy np. światło to przechodzi przez siatkę o oczkach równoległych, obraz składa się z jasnego środkowego prążka (strona lewa, figura środkowa), za którym idą najprzód dwa szerokie prążki ciemne, a następnie dwa kompletne widma, o fiolecie zwróconym ku wnętrzu i o barwach absolutnie czystych. Za temi widmami idą dalsze, coraz to szersze i o barwach stopniowo bledniejących. Zauważmy mimochodem, że widmo dyfrakcyjne jest *normalne*, gdyż rozmaite barwy jego zaj-

mują miejsca, względne rozmiary których są proporcyonalne do odpowiedniej długości fali, podczas gdy w widmie refrakcyjnem barwy te rozszerzają się zależnie od substancyi pryzmatu. Poniżej opisanego obrazu tablica pokazuje widmo otrzymane przez siatkę o oczkach kwadratowych; obok zaś (strona prawa, figura dolna) widzimy obraz przez siatkę o wyglądzie pierzastym. Zjawiska dyfrakcyi, tutaj wymienione, możemy obserwować także, patrząc na słońce poprzez pióro lub też czarną wstążkę, trzymaną tuż przed okiem (Newton); spostrzegamy wtedy liczne łuki tęczowe, które powstają wskutek tego, że cienie rzucane na siatkówkę oka przez oddzielne włókna, otoczone są równoległemi barwnemi prążkami. Podobne zjawiska ukazują się nam również, gdy zamkniętemi prawie oczyma patrzymy na płomień świecy, wtedy bowiem rzęsy tworzą nieprawidłową nieco siatkę.

Wszystkie te doświadczenia wzbudzają w prostym już laiku wielki interes, nieskończenie wszakże ważniejszemi są one dla badaczy przyrody, albowiem każde z nich stanowi nowy dowód na korzyść teoryi falowania światła i potwierdza słuszność wywodów matematycznej analizy, otrzymanych jeszcze przed obserwacyą. Nie możemy się tutaj wdawać w szczegółowe ich wyłuszczanie, powiemy tylko, że w ogóle obrazy te polegają na koincydencyi albo też interferencyi światła przechodzącego przez siatkę. Wszystkie te oddzielne wiązki światła, które przez oczka jej przechodzą równolegle do siebie i pod jednakowym kątem ugięcia odnośnie do promieni na nią padających, zbierają się po przejściu przez objektyw lunety w jednem miejscu płaszczyzny obrazu. Dajmy na to, że światło jest jednorodne i że każda z tych wiązek opóźnia się względem następnej o długość odpowiadającej mu fali; wtedy wszystkie one doskonale wzmacniają się wzajemnie i wytwarzają silnie oświeconą część obrazu. Lecz w pewnej odległości od tego kierunku, gdzie różnica w fazach dwóch sąsiednich wiązek wynosi jedną długość fali, spotykają się wiązki, dla których różnica ta równa się niecałkowitej liczbie fal; tutaj następuje częściowa lub zupełna interferencya. Ta ostatnia jest kompletna dla dwóch wiązek, z których jedna opóźnia się względem drugiej np. o kilkaset i pół długości fal

tak, że w odpowiedniem miejscu powstaje ciemna część obrazu. Zaledwie potrzebujemy dodać, że następne jasne jego części wypadają tam, gdzie różnica w drogach przebytych przez nakładające się wiązki wynosi całkowitą liczbę fal. Stopniowe zmniejszanie się natężenia świetlnego dalszych jasnych linij jest także skutkiem interferencyi, zachodzącej wewnątrz każdej oddzielnej wiązki. Jasne linie leżą tem bliżej obrazu samego otworu, im mniejszą jest długość fali dla jednorodnego światła, użytego do doświadczenia. W razie zaś, gdy światło to jest białem, jasne linie, odpowiadające różnicy jednej fali, układają się kolejno podług długości tej ostatniej i tworzą pierwsze widma dyfrakcyjne po obu stronach jasnego obrazu szczeliny; drugie, trzecie i t. d. widma powstają przy większej różnicy w fazach. Gdy w padającem świetle brak pewnych promieni, w widmach tych pojawiają się ciemne linie; tak np. przy użyciu światła słonecznego można dostrzedz w nich ciemne linie Fraunhofer'a. Dzięki występowaniu tych ostatnich w widmie dyfrakcyjnem, można było dokładnie oznaczyć odpowiadające im długości fal, czego właśnie dokonał sam Fraunhofer. Przy pomocy pewnego przyrządu, pozwalającego mierzyć kąt ugięcia promieni, które przeszły przez siatkę, Angström obliczył wielkość różnicy w drogach przez nie przebytych, równą jednej, dwom, trzem i t. d. falom, zależnie od tego, czy mierzenia czynione były w pierwszem, drugiem lub trzeciem widmie dyfrakcyjnem. W rezultacie znalazł on długość fali dla promieni widma, począwszy od czerwieni do skrajnego fioletu.

§ 6. Barwy cienkich warstw.

Któż z nas nie zabawiał się w dzieciństwie puszczaniem owych lekkich kulek o przedziwnie doskonałej formie i wspaniałych barwach, jednem słowem baniek mydlanych? Wiemy, że gdy z początku posiadają one nieznaczną średnicę, powłoka ich jest jednobarwną i przezroczystą. W miarę wdymania powietrza, ciśnienie na wewnętrzną powierzchnię bańki powiększa się, przez co bańka się rozszerza i powłoka jej staje się coraz

cieńsza. W chwili, gdy grubość jej dochodzi do pewnej granicy, na powierzchni bańki ukazuje się szereg barw, z początku bladych, które jednak stopniowo zyskują na intensywności, wzajemnie się zastępują i mieszając się, tworzą mnóstwo najsubtelniejszych barwnych odcieni. Wreszcie gdy ścianka staje się tak cienka, że nie może przeciwdziałać ciśnieniu gazu na jej wewnętrzną powierzchnię, na bańce pojawiają się ciemne plamy i wkrótce potem pęka ona; ten właśnie stan napięcia przedstawiony jest na tablicy (patrz chromolitografię „bańka mydlana"). Proste to doświadczenie posłużyło Newtonowi za punkt wyjścia do całego szeregu zadziwiających badań i obecnie jeszcze barwy baniek mydlanych stanowią jedno z najciekawszych zjawisk w dziedzinie optyki. W istocie przedstawia ono tylko pojedyńczy wypadek z całego łańcucha zjawisk, jakie zawsze można obserwować, gdy światło ulega naprzemian załamaniu i odbiciu o powierzchnie, ograniczające cienkie warstwy ciał przezroczystych. Podobne zjawiska powstają zarówno w ciałach stałych, jak ciekłych i gazowych. Kryształy rozpadające się, dzięki swej budowie, na bardzo cienkie blaszki, np. mika, gips i talk, dalej cienko wydęte szkło, powierzchnia stali, pokryta cienką warstwą tlenku żelaza, przedstawiają barwy, podobne do barw bańki mydlanej. Należą tutaj także barwy delikatnych błonek na skrzydłach niektórych owadów, szkieł, które przez długi czas wystawione były na działanie wilgoci, zanieczyszczonej wody, pokrytej cienką tłuszczową warstwą i t. p. Wszystkie te zjawiska znane są w fizyce pod ogólnem mianem *barw cienkich warstw*, sam zaś proces zowiemy *iryzacyą*.

Zanim podamy przyczynę tego rozszczepienia światła na barwy prostsze, przytoczymy warunki, w jakich ono może mieć miejsce oraz prawa, określające porządek tych barw. W celu dokładniejszego zbadania odnośnych zjawisk, Newton umieścił wypukłą soczewkę na płaskiej szklanej tafelce i przyciskał ją lekko do tej ostatniej, przez co obydwie powierzchnie stykały się w jednem miejscu, począwszy od którego wzajemna ich odległość była coraz większa, lecz do pewnej granicy dość nieznaczna (fig. 358, str. 576). Gdy od takiego układu dwóch szkieł

odbiło się światło, padające prawie prostopadle do granicznej powierzchni, wokoło punktu zetknięcia pojawiły się różnobarwne współśrodkowe pierścienie, tem węższe, im większą była ich odległość od wspólnego środka. Każda barwa przedstawiała się z początku jako kolista płaszczyzna jednostajnego koloru, która rozszerzając się coraz dalej w miarę silniejszego naciskania soczewki, odłączała się wreszcie jako pierścień i ustępowała miejsca innej barwie wokoło wspólnego środka. Przy dostatecznem ciśnieniu w tym ostatnim pojawia się zawsze czarny krążek, a cały obraz składa się z systemu naprzemian jasnych i ciemnych pierścieni, stopniowo coraz mniej wyraźnych (fig. 359, str. 577). Barwy idące od środkowego punktu do najbliższego ciemnego pierścienia, Newton zaliczył do pierwszego rzędu (od



Fig. 358. System szkieł Newtona.

O do *A*); są one następujące: czarna, blado-niebieska, biała, żółta, pomarańczowa, czerwona. Od tego miejsca do następnego ciemnego pierścienia idą barwy drugiego rzędu: fioletowa, niebieska, żółtawo-zielona, żółto-czerwona (od *A* do *B*); dalej idą jeszcze barwy trzeciego, czwartego i piątego rzędu.

Jeżeli powyższy układ dwóch szkieł rozpatruje się nie w świetle odbitem, lecz przechodzącem, widać również szereg barwnych pierścieni, o wiele jednak bledszych, niż w poprzednim wypadku, oprócz tego porządek barw jest inny i w środku, zamiast czarnego, pojawia się biały krążek. Gdy porównano obrazy, otrzymane w świetle odbitem i przechodzącem, przekonano się, że barwy, pojawiające się w obu razach na tych samych miejscach, są dopełniające tak, że promień odbity w pewnym punkcie oraz promień, który przezeń przechodzi, utworzyłyby razem

Дозволено Цензурою, Варшава 21 Апрѣля 1889 г.

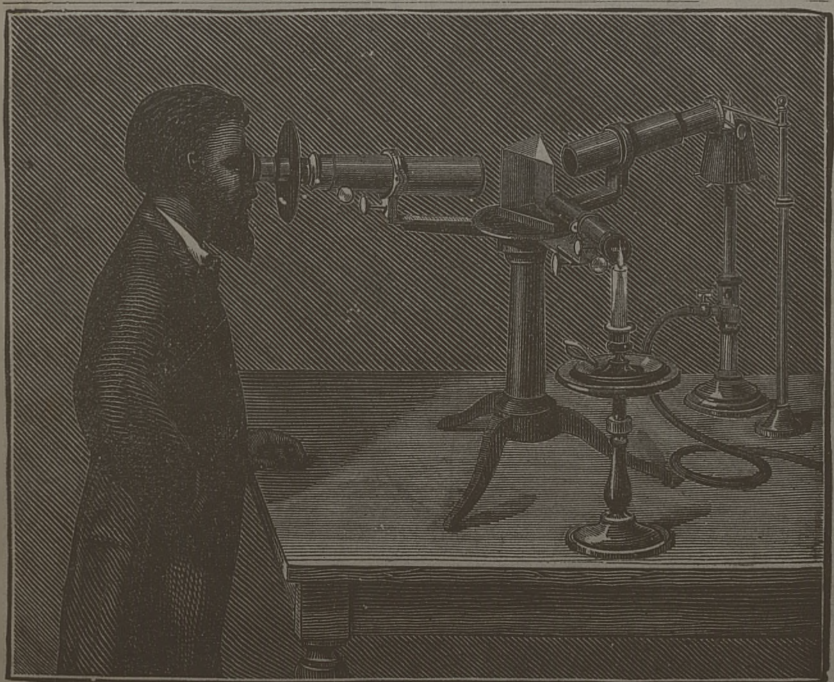
Druk Jana Cotty w Warszawie, Senatorska 29.

Cena 20 kop. **Zeszyt 19.** Cena 20 kop.

SIŁY PRZYRODY.

POPULARNY WYKŁAD FIZYKI

I GŁÓWNIEJSZYCH JEJ ZASTOSOWAŃ.



Spektroskop.

Podług dzieła A. Guillemin'a „Le monde physique"

OPRACOWALI

Józefowa Nusbaum

bak. n. prz.

i

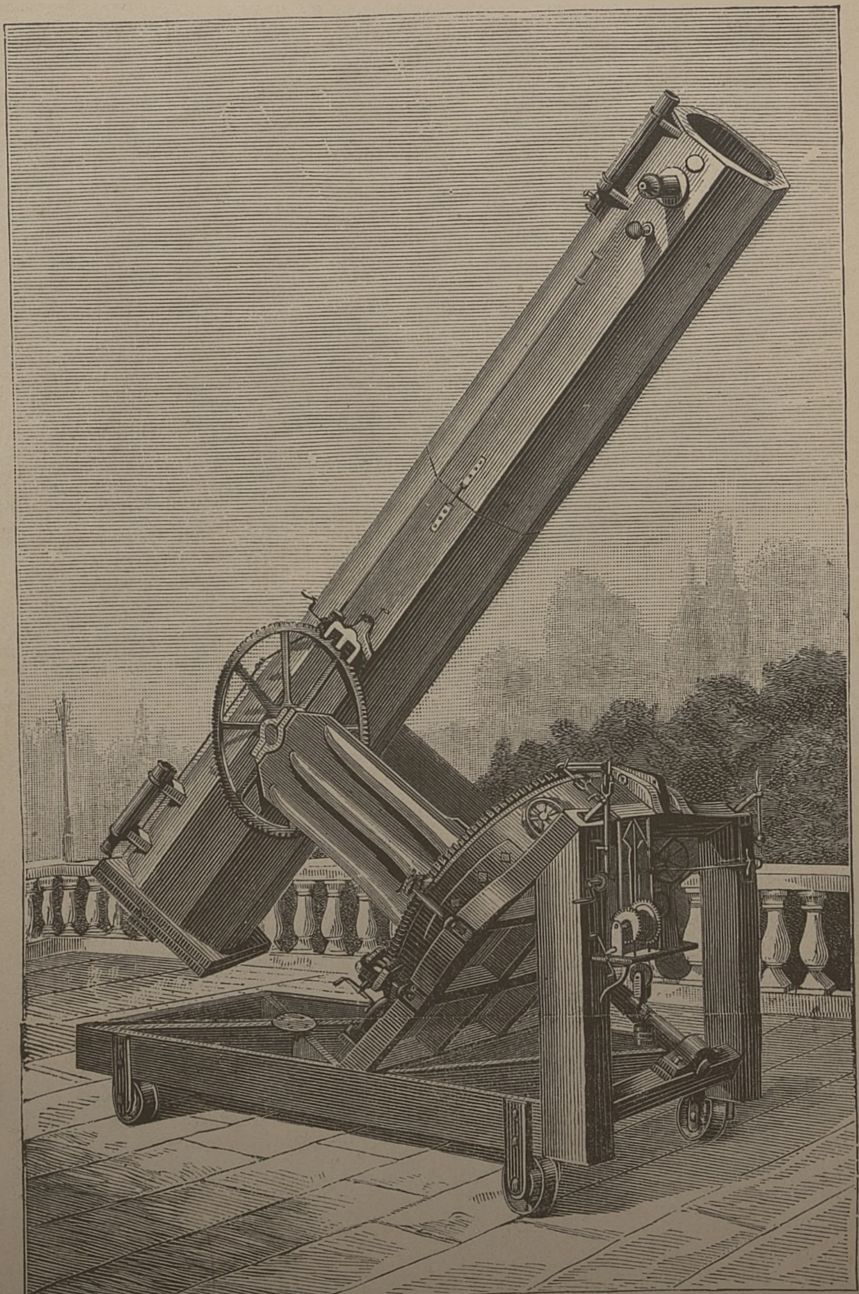
Henryk Silberstein

dr. fil., b. as. chem. przy un. w Bernie.

WARSZAWA.

Nakładem Księgarni **H. Olawskiego**, ul. Mazowiecka № 6.

1889.



Tabl. VII. **Teleskop Foucault'a.**

światło białe. Przy pomocy zwierciadeł udało się Young'owi i Arago dokładnie nałożyć obraz pierścieni, pojawiających się w świetle odbitem, na ich obraz w świetle przechodzącem: okazało się, że gdy obadwa posiadały jednakowe natężenie, pierścienie znikały zupełnie, a raczej dopełniały się wzajemnie do światła białego.

Jeżeli do powyższych doświadczeń używa się światła jednorodnego, wtedy pierścienie są tylko naprzemian ciemne i ja-

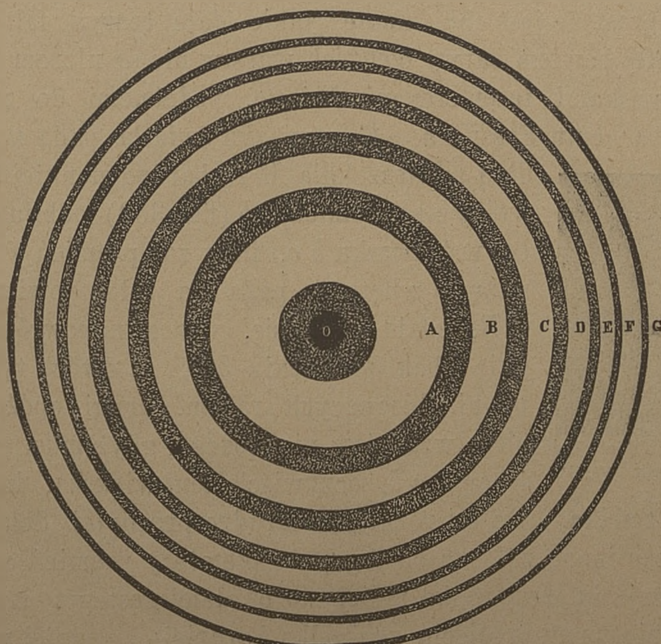


Fig. 359. Barwne pierścienie Newtona.

sne, przyczem średnica ich dla różnych barw widma jest rozmaita: dla czerwieni największa, dla fioletu najmniejsza. To nam tłómaczy, dlaczego światło białe daje pierścienie o wszystkich barwach widma, nie mogą one bowiem wypaść razem. W jednem tylko miejscu pomiędzy *O* i *A* (fig. 359) wszystkie barwy pojawiają się jednocześnie w odpowiednim stosunku i wytwarzają biel. Podobnie jak promienie białe odbite dają pierścienie

o barwach dopełniających dla barw pierścieni przy promieniach przechodzących, tak też przy świetle jednorodnem odbitem pojawiają się jasne pierścienie dokładnie w tych miejscach, gdzie widać ciemne w świetle przechodzącem.

Newton próbował objaśnić wszystkie te zjawiska na podstawie teoryi emissyjnej i przypuszczał, że światło, rozprzestrzeniając się, może peryodycznie znajdować się w dwóch różnych stanach: jednym, w którym łatwo ulega odbiciu, lecz nie załamaniu i drugim, w którym naodwrót łatwo się załamuje, a nie odbija. O wiele prostsze jest objaśnienie, jakie daje teorya falowania, podług niej bowiem barwy cienkich warstw nie są niczem innem, jak zjawiskami interferencyi światła, podobnemi do zjawisk w doświadczeniu Fresnel'a. Gdy wiązka światła pada na przednią powierzchnię *M N* bardzo cienkiej tafelki, wtedy np. promień *a b* (fig. 360) odbija się tutaj w kierunku *b o*, inny zaś promień *f c* przenika do wnętrza, pada na tylną powierzchnię *P R*, gdzie odbija się, wraca napowrót i biegnie obok promienia *b o*. Z dwóch tych promieni, biegnących razem, drugi opóźnia się nieco względem pierwszego, gdyż musi przebyć drogę *c n b*, oczywiście tem większą, im grubszą jest tafelka. Do tej różnicy w drodze przebytej dołącza się się jeszcze inna, zależna od tego, że pierwszy promień odbił się przy przejściu ze środka mniej do bardziej gęstego, drugi zaś przeciwnie przy przejściu ze środka bardziej do mniej gęstego. Na mocy pewnych danych dowiedziono, że pierwszy rodzaj odbicia powoduje w dotychczasowym biegu promienia różnicę równą połowie fali, przy drugim zaś różnicy takiej niema. Otóż jeżeli dwie te różnice razem wzięte wynoszą całą długość fali dla danej jednorodnej barwy i jeżeli patrzymy z *o* na tafelkę, wydaje nam się ona jasną. Tafelki o innej grubości, powodujące opóźnienie równe w sumie nieparzystej liczbie pół-fal i oświecone temże samem światłem, wydają się ciemne, albowiem obadwa promienie, biegnące w kierunku *b o*, znoszą się wtedy wzajemnie. Gdy zaś światło owo jest białe, dana tafelka gasi

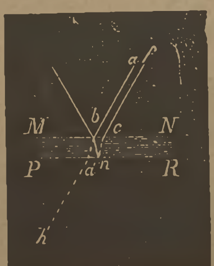


Fig. 360. Objaśnienie barw cienkich warstw.

jeden tylko rodzaj wchodzących w skład jego promieni, odpowiadający grubości tafelki, wszystkie inne zaś promienie wpadają do oka i nadają jej barwę dopełniającą do barwy wygaszonej. W ogóle tedy warstwy wszędzie jednakowo grube przedstawiają się na całej swej przestrzeni jako jednostajnie zabarwione, przyczem rodzaj barwy zależy od ich grubości.

W powyższym wszakże układzie dwóch szkieł Newtona mamy do czynienia z warstwą powietrza, znajdującą się pomiędzy tafelką i soczewką (fig. 358); tam, gdzie te ostatnie stykają się, grubość warstwy jest równa zeru, wzrasta ona jednak stopniowo w miarę oddalania się od punktu zetknięcia. W punkcie tym mamy tylko różnicę, zależną od niejednakowego odbicia się dwóch promieni i równą, jak to wynika z pewnego rozumowania, połowie fali; tutaj też promienie owe znoszą się wzajemnie i powstaje ciemny środek. Począwszy od tego miejsca, różnica w drogach przebytych wynosi kolejno dwie, trzy, cztery, pięć i t. d. pół-fal, wskutek czego następuje naprzemian koincydencya lub interferencya. W taki sposób powstaje, przy użyciu jednorodnego światła, system pierścieni jasnych i ciemnych o wspólnym ciemnym środku. W świetle białem, jak już wspomnieliśmy wyżej, ciemne i jasne pierścienie, odpowiadające rozmaitym barwom, nie mogą wypaść razem, lecz w danem miejscu pojawia się pierścień o barwie, stanowiącej mieszaninę wszystkich tych, które tutaj nie uległy interferencyi.

Rozpatrzyliśmy tedy przyczynę powstawania barw w świetle odbitem, pozostaje nam więc jeszcze objaśnić je w wypadku, gdy badamy daną warstwę w promieniach przechodzących. Niechaj $d\ h$ (fig. 360) przedstawia promień, który przeszedł przez tafelkę wzdłuż $b\ d$; do niego przyłącza się inny, który przebył drogę $f\ c$, następnie przeniknął do wnętrza, tutaj dwa razy (w n i b) uległ zupełnemu wewnętrznemu odbiciu i wzdłuż $b\ d$ wyszedł na zewnątrz, ażeby biedz razem z promieniem $d\ h$. Drugi promień opóźnia się względem pierwszego o drogę $c\ n\ b$; ponieważ przytem obadwa jego odbicia zachodzą przy przejściu ze środka bardziej do mniej gęstego, nie powodują one wcale różnicy w fazach oscylacyi, albo też różnicę równą całej długości

fali i nie wpływają na stopień koincydencyi lub interferencyi, zależnych tylko od grubości tafelki. Widzimy, że w obu wypadkach biegnące razem dwa promienie odbite *b o*, albo też przechodzące *d h* różnią się o drogę *c n b*, tylko że w pierwszym razie do różnicy tej przyłącza się jeszcze różnica pół-fali, zależna od niejednakowych warunków odbicia dwóch takich promieni, w drugim zaś niejednakowości tej niema. Promienie więc przechodzące koincydują wtedy, gdy odbite interferują pomiędzy sobą i naodwrót, rozumiemy tedy, dlaczego układ szkieł Newtona przedstawia w jednorodnem świetle odbitem ciemny środek i ciemne pierścienie w tych miejscach, gdzie w takiemże świetle przechodzącem wypadają jasny środek oraz jasne pierścienie. Z tego samego powodu światło białe odbite daje pierścienie o barwach dopełniających dla barw pierścieni w świetle przechodzącem. To ostatnie daje, jak już wspomnieliśmy, pierścienie o wiele bledsze, niż światło odbite, a to dlatego, że z dwóch promieni, wychodzących z tafelki w kierunku *d h*, jeden ulega dwukrotnemu wewnętrznemu odbiciu, jest więc o wiele słabszy od drugiego tak, że pomimo przeciwnych faz oscylacyi, nie mogą one zupełnie znieść się wzajemnie. Lecz dwa promienie, biegnące w kierunku *b o* i odbite raz tylko jeden, posiadają prawie jednakowe natężenie i w razie, gdy różnica ich faz wynosi nieparzystą liczbę pół-fal, interferują prawie zupełnie, a mniej lub więcej dokładna interferencya stanowi o żywości barw odnośnych pierścieni.

Chcąc ściśle obserwować barwy baniek mydlanych, należy je strzedz od wszelkich wstrząśnień wskutek prądów zewnętrznego powietrza, albowiem wstrząśnienia te, nader nawet nieznaczne, zmieniają nieprawidłowo grubość ścianki, przez co barwy przesuwają się jedna na drugą i dokładne badanie staje się niemożliwem. Dlatego też Newton radził wytwarzać bańki wewnątrz bardzo przezroczystej flaszki, przez korek której przechodzi słomka. Przy zachowaniu podobnych ostrożności można widzieć, że barwy pojawiają się najprzód na najwyższym punkcie bańki mydlanej, a następnie rozprzestrzeniają się po niej ku dołowi, w miarę jak woda opuszcza się do najniższego jej punktu i powłoka staje się od góry coraz cieńsza. Gdy z początku ścian-

ka bańki jest jeszcze dostatecznie gruba, nie mogą na niej powstać żadne barwy interferencyjne, gdy jednak grubość ta stopniowo maleje, zjawisko iryzacyi zbliża się coraz bardziej do tego, jakie widzimy w warstwie powietrza pod soczewką: czerń, pojawiająca się na bańce przed jej pęknięciem, odpowiada bezbarwnemu miejscu w punkcie zetknięcia się soczewki z płaską tafelką szklaną.

Porządek barw na bańce mydlanej, badanej w świetle odbitem, jest inny, niż w świetle przechodzącem. Gdy np. spostrzegamy w niej przez odbicie obraz jasnego nieba, a następnie patrzymy przez nią na to ostatnie, przekonywamy się, że w tym drugim wypadku barwa jej jest dopełniającą do barwy w pierwszym razie. Bańka mydlana, puszczona w swobodnem powietrzu, przedstawia o wiele żywszą grę barw i szybszą ich zmianę, niż bańka, zawarta we flaszce, albowiem swobodny przepływ powietrza powoduje ciągły prąd cieczy, tworzącej ściankę, przez co grubość jej zmienia się ciągle w rozmaitych punktach. Lecz co zjawisko samo przy użyciu flaszki traci na piękności, to zyskuje na znaczeniu naukowem, wtedy bowiem odbywa się prawidłowo i może ułatwić zbadanie odnośnych faktów.

W końcu nadmieńmy jeszcze, że z barwy można sądzić o grubości ścianki, jeżeli tylko znaną jest przytem długość fali dla oddzielnych barw. Tak naprzykład obliczono z łatwością, że czerń musi pojawić się wtedy, gdy grubość ścianki wynosi mniej niż jednę dziesięciotysięczną część milimetra, gdyby więc można było puścić bańkę, mającą wszędzie tę obliczoną grubość, byłaby ona zupełnie niewidoczną.

ROZDZIAŁ X.

Polaryzacya światła.

§ 1. Podwójne załamanie.

Kiedy w roku 1669 słynny lekarz duński Erazm Bartholinus badał kryształy, przysłane mu z wyspy Islandyi, zdziwił się niezmiernie, gdy zauważył, że *przedmioty, przez nie rozpatrywane, wydają się podwójne.* O ważnem tem odkryciu doniósł on w oso-

bnym traktacie, w którym przytoczył wszystkie swe obserwacye oraz towarzyszące im poboczne okoliczności, przez co zwrócił uwagę na zjawisko, mające dla całego rozwoju nauki o świetle nadzwyczaj ważne znaczenie. W dwadzieścia lat potem Huyghens powtórzył doświadczenia Bartholinus'a i zbadał prawa odnośnych zjawisk, starając się je objaśnić na podstawie teoryi undulacyjnej. Od owego czasu liczni pracownicy zajmowali się tym przedmiotem, należącym do najważniejszych z zakresu optyki.

W pewnych pokładach wapiennych można znaleść minerał,

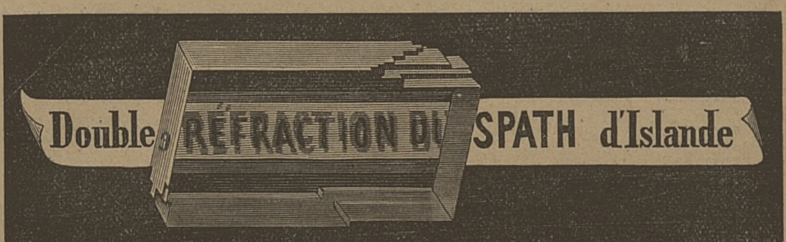


Fig. 361. Podwójny obraz przedmiotów, rozpatrywanych przez spat wapienny.

krystalizujący w formie romboedru—bryły ograniczonej sześcioma płaskiemi rombami, z których każde dwa naprzeciw siebie leżące są równoległe między sobą. Minerał ten, zwany spatem wapiennym albo islandzkim, jest w najczystszej swej formie zupełnie przezroczysty i bezbarwny. Gdy na jednę z jego płaszczyzn rzucimy prostopadłą do niej wiązkę promieni równoległych, z przeciwległej płaszczyzny wyjdą *dwie* wiązki świetlne, tworzące na ekranie dwa jasne punkty. Zjawisko to zowie się *podwójnem załamaniem*. Ponieważ pojedyńczy promień, przechodząc przez spat wapienny, rozszczepia się na dwa promienie, to patrząc przez ten minerał na rozmaite przedmioty, widzimy je podwójnie; tak np. umieściwszy go na jakiem piśmie, będziemy widzieli przezeń każdą literę podwójnie (fig. 361).

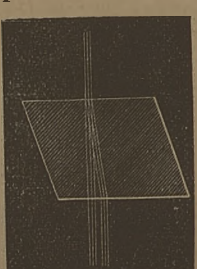


Fig. 362. Podwójnie załamana wiązka świetlna.

Powróćmy teraz do owych dwóch wiązek światła, wychodzących z kryształu. Jedna z nich stanowi przedłużenie padającej (fig. 362), tak jak gdyby przeszła przez zwykłe szkło o ró-

wnoległych ścianach, druga zaś jest przesunięta na bok w kierunku, zależnym od położenia kryształu. Gdy obracamy ten ostatni w taki sposób, że nie zmieniamy nachylenia jego do promieni padających, wtedy jasny punkt na ekranie, odpowiadający pierwszej wiązce, zajmuje stale jedno i to samo miejsce; przeciwnie jasny punkt, utworzony przez drugą wiązkę, opisuje przy obracaniu kryształu koło. Jeżeli natomiast pochylamy kryształ i nadajemy mu względem promieni padających coraz to inne położenie, wtedy pierwsza wiązka zachowuje się tak, jak tego wymagają wiadome nam prawa załamania: stanowi ona tak zwane promienie *zwyczajnie załamane.* Druga atoli wiązka przy pochylaniu kryształu prawom tym nie podlega, to znaczy, że nie zawsze pozostaje w jednej płaszczyznie z promieniami padającemi, ani też nie istnieje dla niej stały stosunek pomiędzy wstawą kąta padania i wstawą kąta załamania; drugą tę wiązkę zowiemy *nadzwyczajnie załamaną.* Spółczynnik załamania dla tej ostatniej jest bardzo trudno oznaczyć, albowiem kierunek wychodzących z kryształu promieni zależy od jego kształtów; ażeby czytelnik lepiej to zrozumiał, musimy powiedzieć jeszcze słów kilka o tych kształtach.

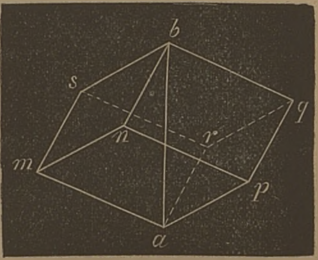


Fig. 363. Romboedr.

Figura 363 przedstawia szematycznie wspomnianą już wyżej najpospolitszą formę romboedryczną spatu wapiennego, w której na sześć wierzchołków składają się po dwa kąty ostre i jeden rozwarty, na pozostałe zaś dwa wierzchołki (*a* i *b*)—same kąty rozwarte. Linia prosta *a b*, łącząca dwa ostatnie wierzchołki romboedru, stanowi jego oś, wokoło której płaszczyzny, krawędzie i kąty wierzchołkowe są ułożone symetrycznie. Na fig. 364 (str. 584) widzimy oprócz formy opisanej (*a*) inną, w której wszystkie ostre kąty wierzchołkowe są zastąpione przez sześć płaszczyzn równoległych do osi kryształu (*b*); wreszcie gdy i dwa rozwarte kąty wierzchołkowe znikają, a na ich miejsce pojawiają się płaszczyzny, prostopadłe do osi, mamy formę przedstawioną w *c*. Jeżeli wyobrazimy sobie, że prawa i lewa jej krawędź zastąpione zostały

przez płaszczyzny, otrzymamy prostokątny równoległościan, którego ściany dolna i górna są prostopadłe do osi kryształu, dwie zaś boczne oraz przednia i tylna są do niej równoległe. Rzućmy na przednią ścianę takiego kryształu, którego oś niechaj zajmuje położenie *pionowe*, *poziomą* wiązkę promieni świetlnych, padających pod kątem prostym, a zobaczymy, że przez tylną ścianę wychodzi również pojedyńcza wiązka, stanowiąca przedłużenie padającej. Przy obracaniu kryształu wokoło osi, promienie pa-

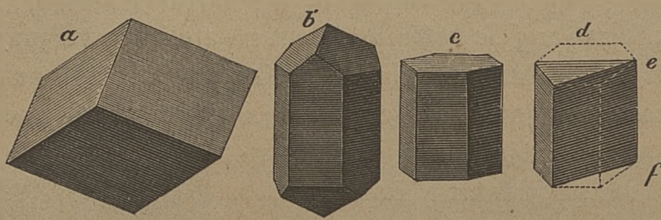


Fig. 364. Krystaliczne formy spatu wapiennego, pochodne od romboedru.

dają coraz bardziej pochyło, a wtedy poczyna występować zjawisko podwójnego załamania i na ekranie ukazują się dwa jasne punkty, które wszakże pozostają zawsze w płaszczyznie padania, *w danym wypadku prostopadłej do osi kryształu.* Oprócz tego obie wiązki podlegają prawu Snell'a, to znaczy, że spółczynnik załamania dla każdego z nich jest stały, jak tego dowodzą pomiary, wykonane z pryzmatem, wyciętym ze spatu wapiennego i mającym krawędź załamującą *e f* równoległą do osi kryształu (fig. 364 *d*). Otrzymane wielkości liczebne pokazują, że w tych warunkach promień zwyczajny rozprzestrzenia się wewnątrz kryształu z prędkością 0,603, promień zaś nadzwyczajny—z prędkością 0,673 (jeżeli prędkość światła w powietrzu przyjmiemy za 1). Fig. 365 przedstawia graficznie zachowanie się dwóch tych rodzajów promieni wewnątrz kryształu. Koło zakreślone z punktu *a* promieniem *a o*, równym 0,603, wyobraża falę zwy-

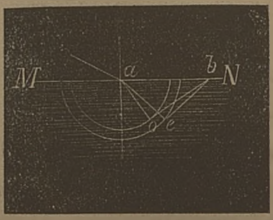


Fig. 365. Podwójne załamanie. Wypadek pierwszy.

czajną, koło zaś o promieniu *a e*, równym 0,673, falę nadzwyczajną, jakie się utworzyły w krysztale w tym samym czasie, w którym w powietrzu powstała fala o promieniu równym 1. Nadmieńmy tutaj jeszcze, że nawet w razie, gdy owa pozioma wiązka światła pada prostopadle na przednią ściankę pionowo stojącego kryształu i wychodzi przez tylną jako pojedyńcza, to w istocie składa się ona wtedy z dwóch wiązek, które przeszły przez kryształ w tym samym kierunku, lecz z niejednakową prędkością, jak o tem można sądzić na mocy pewnych zjawisk.

Rozpatrzmy teraz wypadek, gdy oś kryształu zajmuje położenie *poziome*. Jeżeli ta sama co poprzednio wiązka światła pada na przednią jego ściankę prostopadle do osi, wówczas wychodzi zeń jako pojedyńcza i stanowi przedłużenie padającej. Przy obracaniu zaś kryształu wokoło pionowej krawędzi, promienie padają bardziej pochyło, załamują się podwójnie i obadwa, to jest zwyczajny i nadzwyczajny pozostają stale w poziomej płaszczyźnie padania. Pierwszy z nich podlega oprócz tego prawu Snell'a, dla drugiego zaś spółczynnik załamania nie jest stały, to znaczy, że prędkość jego wewnątrz kryształu nie jest jednakowa w dwóch różnych kierunkach.

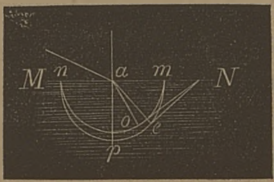


Fig. 366. Podwójne załamanie. Wypadek drugi.

Fala zwyczajna wyobrażona jest przez *koło* o promieniu *a o*, równym 0,603 (fig. 366), fala zaś nadzwyczajna przez *elipsę* (¹), której połowa dużej osi *a p* równa 0,673 jest prostopadła do osi kryształu, połowa zaś małej osi, równa 0,603, biegnie w kierunku samej osi kryształu. Innemi słowy, promień nadzwyczajny posiada w kierunku osi kryształu prędkość mniejszą, niż w kierunku do niej prostopadłym. Jeżeli wreszcie wiązka światła pada prostopadle na górną ścianę kryształu w kierunku samej jego osi, wtedy wychodzi zeń jako pojedyńcza, lecz nie pozornie, ale istotnie jako taka, albowiem w kierunku

---

(¹) Koło przedstawia figurę mającą tylko jedną średnicę albo oś, elipsa zaś jest jakby wydłużonem kołem i posiada dwie osie: jednę dużą i jednę małą.

osi prędkość dla promienia zwyczajnego i nadzwyczajnego jest jednakowa, równa 0,603. Widzimy więc, że promień, przechodzący przez kryształ wzdłuż jego osi, albo też równolegle do niej, nie ulega podwójnemu załamaniu, w każdem zaś innem położeniu rozszczepia się na dwa, biegnące oddzielnie lub razem, lecz zawsze z różną prędkością. Z tego powodu oś spatu islandzkiego zowie się także jego *osią optyczną*, wszelka zaś płaszczyzna, przechodząca przez tę oś lub równoległa do niej, stanowi *przecięcie główne*.

Jak już wspomnieliśmy wyżej, oś spatu wapiennego jest zarazem osią symetryi, wokoło której płaszczyzny jego, krawędzie i kąty są ze wszystkich stron ułożone symetrycznie. Okazało się, że jest ona także osią symetryi odnośnie do rozprzestrzeniania się światła i dlatego słusznie bardzo upatrywano przyczynę podwójnego jego załamania w samej budowie tego kryształu. Spat wapienny łupie się z największą łatwością w kierunku równoległym do ograniczających go płaszczyzn romboedrycznych, wskutek czego można go podzielić na coraz mniejsze fragmenty, mające ściśle prawidłową formę. Fakt ten dowodzi, że kształt kryształu nie jest tylko, że tak powiemy, powierzchowną jego cechą, lecz ma źródło głębsze, a mianowicie—w pewnym ściśle określonym układzie samych cząstek. Krystalografia dzieli na podstawie tego układu wszystkie w ogóle formy krystaliczne na sześć systemów. Przedstawicielem typowym pierwszego systemu, zwanego prawidłowym, jest sześcian; kryształy tutaj należące posiadają trzy wzajemnie prostopadłe i równej długości osie, z których każda może być uważana za główną. Takie np. ciała jak fluspat lub sól kamienna, krystalizujące w prawidłowym systemie, zachowują się w obec przechodzącego przez nie światła podobnie jak substancye niekrystaliczne, np. szkło albo ciecze, to znaczy, że załamują je w zwykły sposób, nie rozszczepiając go na dwie oddzielne wiązki.

Następne dwa systemy krystalograficzne, kwadratowy i sześcioboczny posiadają także trzy osie, z których dwie tylko mają równą długość tak, że jedna z nich wyróżnia się jako oś symetryi. Kryształy tych systemów załamują światło podwójnie i dają

promień zwyczajny i nadzwyczajny; w jednym tylko kierunku samej osi promień biegnie jako pojedyńczy. Jeżeli promień nadzwyczajny rozprzestrzenia się z większą prędkością, niż zwyczajny, wtedy odpowiadająca mu wewnątrz kryształu powierzchnia falowa, przedstawia *sferoid wydłużony* w kierunku prostopadłym do osi (czyli spłaszczony w kierunku samej osi); obejmuje on wokoło *kulistą* falę, należącą do promienia zwyczajnego. W podobny sposób światło zachowuje się, jak widzieliśmy, w spacie wapiennym, a także w turmalinie, rubinie, szmaragdzie i innych; kryształy takie zowią się *odjemnemi*. Gdy przeciwnie promień nadzwyczajny rozchodzi się z mniejszą, niż zwyczajny prędkością, wtedy odpowiadająca mu powierzchnia falowa przedstawia się jako sferoid wydłużony w kierunku samej osi kryształu, otoczony kulistą powierzchnią falową, pochodzącą od promienia zwyczajnego i stykający się z nią w końcowych punktach osi. Takie kryształy zowią się *dodatniemi*, a jako przykład może służyć kryształ górny czyli kwarc.

Do trzech pozostałych systemów (jednotrzyosiowy, dwuskośnoosiowy i trójskośnoosiowy) należą kryształy załamujące światło również podwójnie, lecz tak, że żaden z dwóch promieni nie podlega prawu załamania. Oprócz tego, w kryształach tych istnieją dwa kierunki, wzdłuż których światło przechodzi jako wiązka pojedyńcza, innemi słowy posiadają one *dwie osie optyczne*. Powierzchnie falowe od dwóch promieni otaczają jedna drugą, lecz stykają się w czterech miejscach, t. j. w końcowych punktach obu osi, w kierunku których niema, jak powiedzieliśmy, podwójnego załamania, a więc i prędkość dla obydwóch promieni jest jednakowa.

§ 2. **Własności promieni spolaryzowanych.**

Widzieliśmy w poprzednim paragrafie, że wiązka światła, po przejściu przez kryształ spatu wapiennego, rozszczepia się na dwie: zwyczajną i nadzwyczajną. Obecnie zajmiemy się bliższem zbadaniem pytania, czy posiadają one te same lub też inne

własności, co naturalne światło padające. Gdy wiązka światła naturalnego przechodzi przez taki kryształ i ulega w nim podwójnemu załamaniu, oba rodzaje promieni wychodzących posiadają zawsze *jednakowe świetlne natężenie*, niezależnie od położenia jego względem promieni padających, jak tego dowodzi doświadczenie szematycznie przedstawione na obocznej figurze. Promienie słoneczne wpadające przez otwór *L*, przechodzą przez romboedr spatu wapiennego, którego przecięcie główne *S S* znajduje się w płaszczyznie rysunku, rozszczepiają się tutaj na wiązki *A A'* i *A S* i, po przejściu przez soczewkę, tworzą na ustawionym w jej ognisku ekranie obraz zwyczajny *O* oraz nadzwyczajny *E* (fig. 367, № 1). Obrazy te znajdują się w płaszczyznie głównego przecięcia kryształu, przy pochylaniu zaś tego ostatniego zmieniają swe miejsca na ekranie, obracają się wokoło punktu *L'*, leżącego na jednej prostej linii z otworem *L* i przyjmują, gdy przecięcie to stanowi z płaszczyzną rysunku kąty równe 0,45, 90, 135, 180, 225, 270, 360 stopni, położenia pokazane na fig. 367, № 2, posiadając przytem stale jednakowe natężenie. Zmodyfikujmy obecnie powyższe doświadczenie w ten sposób, że na drodze promieni wychodzących z romboedru *S*

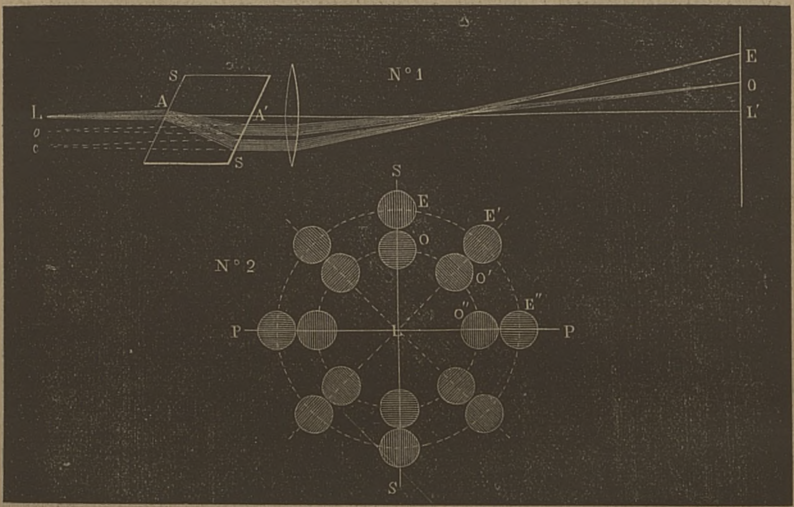


Fig. 367. Jednakowe natężenie obrazu zwyczajnego (*O*) i nadzwyczajnego (*E*), niezależnie od położenia kryształu.

ustawiamy ekran *M M*, który zatrzymuje promień nadzwyczajny, przepuszcza zaś tylko zwyczajny *B D* (fig. 368). Ten ostatni rzucamy następnie na drugi romboedr *S'* i przepuszczamy przez soczewkę, zupełnie tak samo, jak w poprzedniem doświadczeniu. Widzimy, że ten zwyczajnie załamany promień, po przejściu przez drugi romboedr, ulega znów podwójnemu załamaniu i tworzy na ekranie obraz zwyczajny *O'* i nadzwyczajny *E'* (fig. 368, № 1). Obrazy te również znajdują się w płaszczyznie głównego przecięcia drugiego kryształu *S'*, przy obracaniu zaś jego zaj-

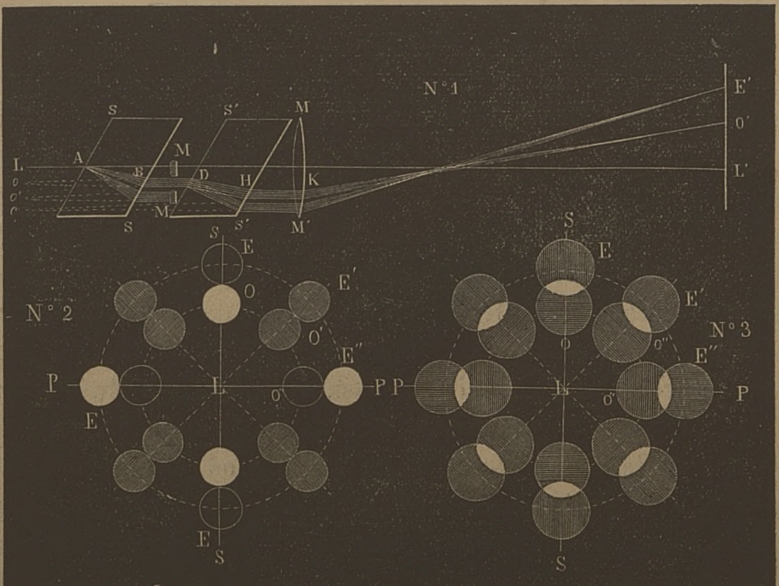


Fig. 368. Różne natężenia obrazu zwyczajnego i nadzwyczajnego, zależne od względnego położenia dwóch kryształów.

mują takie same położenia, jak w pierwszem doświadczeniu, z tą jednak różnicą, że ich natężenie świetlne zmienia się przytem i zależy od *kąta, jaki tworzy rzeczona płaszczyzna z płaszczyzną głównego przecięcia pierwszego kryształu S* (fig. 368, № 2). Gdy kąt ten jest równy zeru, to jest gdy przecięcie główne *S'* jest równoległe do takiegoż przecięcia *S*, obrazu nadzwyczajnego wcale niema, czyli że promień *B D* przechodzi wtedy przez drugi kryształ, nie rozdwajając się. Obraz nadzwyczajny występuje wszakże natychmiast po wyprowadzeniu drugiego kryształu

z rzeczonego położenia, przyczem natężenie jego wzrasta w miarę kąta nachylenia, przeciwnie zaś obraz zwyczajny słabnie. Przy kącie, równym 45° natężenie świetlne obu obrazów O' i E' jest jednakowe, przy 90° obraz zwyczajny znika, nadzwyczajny zaś posiada największe natężenie, czyli że przy wzajemnie prostopadłem położeniu dwóch głównych przecięć S' i S promień $B\ D$ przechodzi przez drugi kryształ tylko jako nadzwyczajny. Przy powiększaniu kąta od 90° do 180°, natężenie obu obrazów przedstawia się tak samo, jak od 90° do 0°; wreszcie od 180° do 360° przybierają one ten sam blask, co od 180° do 0°.

Widzimy tedy, że zwyczajnie załamany promień $B\ D$, wychodzący z pierwszego kryształu, daje początek tylko promieniowi zwyczajnemu albo też nadzwyczajnemu, zależnie od tego, czy główne przecięcie drugiego kryształu jest do pierwszego równoległe, czy też prostopadłe; podwójne zaś załamanie, jakiemu promień $B\ D$ w innych położeniach ulega, występuje symetrycznie po obu stronach poziomej lub pionowej płaszczyzny, a przy pewnych kątach nachylenia promień ten daje początek dwom obrazom o niejednakowem natężeniu. Doświadczenie to pokazuje, że promień $B\ D$ posiada własności inne, niż światło naturalne, albowiem to ostatnie daje obrazy zawsze jednakowo silnie oświecone, tamten zaś—obrazy, zależne od nachylenia dwóch głównych przecięć odnośnych kryształów. Zachowanie się promienia $B\ D$ pokazuje, że w różnych płaszczyznach posiada on rozmaite własności, że jest inny powyżej, inny—poniżej kierunku, w jakim się rozprzestrzenia, nareszcie inny po stronie lewej i prawej od tegoż kierunku. Taki promień nazywa się *spolaryzowanym.*

Zjawiska interferencyi przekonały nas, że światło polega na drganiach cząstek eteru, pozwoliły one także obliczyć częstość tych drgań dla różnych barw i odpowiadające im długości fali, lecz nie dały żadnych wskazówek co do kierunku samych drgań. Można było tedy przypuszczać, że te ostatnie są albo tylko podłużne, jak drgania dźwiękowe, albo też tylko poprzeczne, jak te, które rozprzestrzeniają się na powierzchni wody, albo nareszcie—w części podłużne, w części poprzeczne. Otóż tylko

zjawiska polaryzacyi światła mogą objaśnić nas co do tej kwestyi. Gdyby mianowicie drgania promienia zwyczajnego, wychodzącego z pierwszego kryształu, odbywały się podłużnie w kierunku jego rozprzestrzeniania się, wtedy posiadałby on te same własności w płaszczyznie pionowej i poziomej. Doświadczenia dowiodły, że tak nie jest; przeciwnie widzieliśmy, iż promień ten, padając na drugi kryształ, wychodzi zeń jako zwyczajny albo nadzwyczajny, zależnie od tego, czy główne przecięcie tego kryształu jest równoległe lub prostopadłe do tamtego i dlatego musimy odrzucić przypuszczenie o drganiach wyłącznie podłużnych. Natomiast drgania poprzeczne tłómaczą zachowanie się omawianego promienia, jeżeli bowiem przypuścimy, że odbywają się one tylko w kierunku prostopadłym do drogi (*B D*) jego rozchodzenia się (fig. 368, № 1), to jest powyżej i poniżej płaszczyzny rysunku, a nie z boków jej, musimy także przyjąć, że górna i dolna strona promienia różnią się w czemkolwiek od bocznych, t. j. prawej i lewej. Wreszcie gdyby na promień *B D* składały się oprócz poprzecznych, jeszcze drgania podłużne, te ostatnie przeszłyby przez drugi kryształ tak samo jak przez pierwszy, niezależnie od jego położenia. Lecz przy wzajemnie prostopadłym kierunku dwóch głównych przecięć, promień zwyczajny wcale z drugiego kryształu nie wychodzi, a ponieważ w tem miejscu na ekranie, gdzie on powinienby się znajdować, nietylko nie występują objawy świetlne, lecz także i cieplne, wnioskujemy, że do miejsca tego nie dochodzą żadne drgania eteru, którym zwykle objawy te przypisujemy, czyli że przynajmniej w spolaryzowanym promieniu niema wcale drgań podłużnych, a tylko poprzeczne.

Fig. 353 (str. 548) przedstawia promień spolaryzowany; płaszczyzna zaś, w której odbywają się jego drgania, zowie się *płaszczyzną drgań*. Widzieliśmy w powyższem doświadczeniu (fig. 368), że zwyczajny promień *B D*, po wyjściu z pierwszego kryształu, ustawionego tak, że główne jego przecięcie jest poziome, zachowuje się zupełnie symetrycznie względem płaszczyzny poziomej lub pionowéj przezeń poprowadzonej; *niewiadomo jednak dotychczas napewno, w której mianowicie z tych dwóch pła-*

szczyzn zachodzą drgania, przyjmujemy tylko, że są one w danym wypadku pionowe, czyli że *płaszczyzna drgań dla promienia zwyczajnego jest prostopadłą do głównego przecięcia kryształu.* Jeżeli w temże doświadczeniu zatrzymamy za pomocą ekranu promień zwyczajny *B D*, a rzucimy na drugi kryształ nadzwyczajny, przekonamy się, że przy równoległem położeniu dwóch głównych przecięć znika na ekranie obraz zwyczajny, przy prostopadłem zaś — nadzwyczajny. Zjawisko jest tedy wprost przeciwne temu, jakie obserwuje się przy przepuszczaniu promienia zwyczajnego. Promień tedy nadzwyczajny okazuje się także spolaryzowanym, lecz drgania jego odbywają się w kierunku prostopadłym do kierunku drgań dla promienia *B D*, czyli że *płaszczyzną drgań dla promienia nadzwyczajnego jest samo przecięcie główne.*

Nasuwa się jeszcze pytanie, czy drgań podłużnych brak tylko w spolaryzowanych promieniach, czy też w ogóle niema ich w żadnem świetle, możnaby bowiem przypuścić, że drgania takie istnieją w promieniach padających na kryształ, lecz przy przejściu przezeń ulegają pochłonięciu. Dla rozstrzygnięcia tego pytania, rzućmy światło słoneczne, wpadające przez niewielki otwór, na romboedr spatu wapiennego: otrzymamy na ekranie obrazy zwyczajny i nadzwyczajny, o jednakowem, jak wiemy, natężeniu. Otwór tak jest dobrany, że obrazy te częściowo zachodzą jeden na drugi (fig. 368, № 3) i ta właśnie wspólna część, gdzie mieszają się drgania promienia zwyczajnego i nadzwyczajnego, posiada takie same prawie natężenie, jak obraz słońca, otrzymany przez ten sam otwór, lecz od bezpośrednio padających promieni słonecznych. Nieznaczna istniejąca tutaj różnica w natężeniu tłómaczy się podwójnem odbiciem o przednią i tylną ścianę kryształu, jakiemu ulega przechodzące przezeń światło. Jeżeli więc, jak powiedzieliśmy, drgań podłużnych niema w świetle spolaryzowanem, to na mocy przytoczonego doświadczenia i innych wolno mniemać, że niema ich także w świetle naturalnem i że ono polega tylko na drganiach poprzecznych. Badając bliżej tę wspólną część światła, wychodzącego z kryształu, w której mieszają się z sobą promienie zwyczajny i nad-

zwyczajny, przekonywamy się dalej, że zachowuje się ona zupełnie tak samo, jak światło naturalne, to jest nie spolaryzowane. Promień tedy zwyczajny i nadzwyczajny, spolaryzowane w płaszczyznach wzajemnie prostopadłych i mające jednakowe natężenie, zmięszane z sobą, dają promień naturalny. Naodwrót także wiązkę światła naturalnego możemy zamienić na dwie spolaryzowane i o jednakowem natężeniu, których drgania odbywają się w płaszczyznach wzajemnie do siebie prostopadłych. Dwie takie wiązki nie mogą powodować zjawisk interferencyi, niezależnie też od różnicy w fazach, dają zawsze promień, którego natężenie jest równe sumie natężeń składowych promieni. Fakt ten, którego istnienie można było naprzód wywnioskować teoretycznie, został stwierdzony na drodze doświadczalnej przez Fresnel'a i Arago.

Z księgi o dźwięku (str. 263) wiemy już, że prędkość, z jaką rozchodzi się dany drgający ruch, zależy od sprężystości przenoszącego go środka. Stosuje się to zarówno do drgań dźwiękowych, jak i świetlnych. Otóż przypuszczamy, że w przestrzeniach wszechświatowych, w powietrzu oraz we wszystkich ciałach, pojedyńczo załamujących światło, jak np. woda lub szkło, sprężystość eteru jest jednakowa we wszystkich kierunkach. W ciałach takich obydwie składowe części, na jakie można rozłożyć promień światła naturalnego, dla których drgania eteru odbywają się w płaszczyznach wzajemnie prostopadłych, rozprzestrzeniają się z zupełnie jednakową prędkością, przez co nic się nie zmienia we względnym, pierwotnym ich do siebie stosunku; na całej swej drodze kombinują się one i wytwarzają jeden wypadkowy promień naturalny. Lecz co się tyczy kryształów podwójnie załamujących światło, to prawdopodobnie sprężystość eteru nie jest w nich jednakowa we wszystkich kierunkach, a przypuszczenie to tembardziej wyda nam się słusznem, gdy weźmiemy jeszcze pod uwagę fakt (o którym pomówimy w następnej księdze), że kryształy takie przy ogrzewaniu rozszerzają się w różnych kierunkach niejednakowo, dalej że to samo stosuje się do prędkości rozprzestrzeniania się w nich ciepła i wreszcie, że różne ich płaszczyzny rozmaicie zachowują się względem czynni-

ków mechanicznej albo chemicznej natury. Różnicę tę we własnościach tłómaczymy sobie przez pewien określony układ cząstek, składających kryształ podwójnie załamujący światło. Przyjmujemy, że np. w kryształach o jednej osi optycznej, sprężystość eteru jest inna w kierunku tejże osi, inna znów w kierunku do niej prostopadłym i że zmienia się przy przejściu od jednego z nich do drugiego. Gdy promień naturalny przechodzi przez taki kryształ *wzdłuż osi optycznej*, obydwie składowe części promienia drgają w płaszczyznach prostopadłych do osi i prostopadłych wzajemnie do siebie; ponieważ sprężystość eteru, a więc i prędkość światła jest w tych płaszczyznach wszędzie jednakową, promień wychodzi z kryształu nierozszczepionym, to jest takim, jakim przyszedł. Lecz gdy promień naturalny przechodzi przez płaszczyznę kryształu *prostopadłą do osi optycznej*, wtedy jedna jego część drga w tejże płaszczyznie, druga zaś—w płaszczyznie samej osi i dlatego rozszczepia się on na dwa promienie spolaryzowane, rozchodzące się z rozmaitą prędkością. Takiemu samemu rozszczepieniu ulega każdy promień naturalny, jeżeli tylko nie pada w płaszczyznie, równoległej do osi optycznej.

§ 3. Przyrządy polaryzacyjne. Polaryzacya przez odbicie i zwykłe załamanie.

Oko nasze samo nie jest w stanie odróżnić światła spolaryzowanego od naturalnego; wyręczają nas pod tym względem ciała podwójnie załamujące, przedstawiające znakomity środek do odkrycia tej różnicy; z pomiędzy nich najodpowiedniejszemi są tafelki albo pryzmaty, wycięte z kryształu jednoosiowego. Przyrządy, pozwalające rozstrzygnąć, czy światło jest spolaryzowane, czy nie, oraz dające nam możność oznaczenia kierunku płaszczyzny drgań, zowią się *analizatorami* albo *polaryskopami*. Ażeby ułatwić czytelnikowi zrozumienie zasady najprostszego z takich przyrządów, posłużymy się następującem, dowcipnem porównaniem Wundta. Wyobraźmy sobie, że rzucamy igły na sito, którego poziome dno przedstawia szeregi szczelin prostolinijnych i równoległych pomiędzy sobą; jeżeli tedy osie igieł są poziome,

tylko te z nich przejdą przez sito, które są równoległe do jego szczelin. Przypuśćmy, że przy pewnem położeniu sita, wszystkie poziomo leżące igły przechodzą przezeń, to rzecz oczywista, że gdy obrócimy sito w płaszczyźnie poziomej na 90^0, ani jedna z tych igieł z niego nie wyjdzie.

Otóż istnieją ciała, zachowujące się względem światła podobnie jak owo sito względem igieł, padających na jego dno. I tak w zabarwionych podwójnie załamujących kryształach pochłanianie światła nie zależy jedynie od częstości drgań przechodzących promieni, lecz także od nachylenia płaszczyzny tych drgań względem osi optycznej. Występuje to szczególniej wyraźnie w turmalinie, który w pewnych warunkach pochłania całkowicie pro-

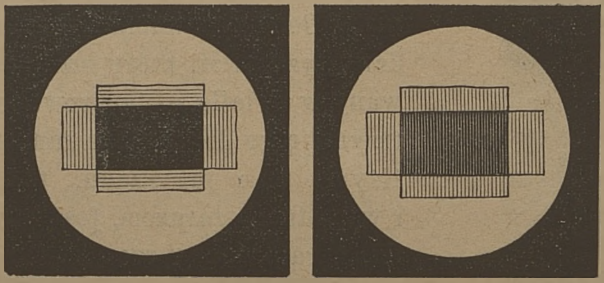


Fig. 369.

Tafelki turmalinowe wzajemnie prostopadłe. — Tafelki turmalinowe wzajemnie równoległe.

mienie zwyczajne. Tafelka, wycięta z kryształu turmalinu równolegle do jego osi, *przepuszcza tylko promienie nadzwyczajne, których drgania odbywają się właśnie równolegle do tejże osi;* dlatego też tafelka taka może służyć zarówno do spolaryzowania światła (polaryzator), jak i do jego analizy (polaryskop). Weźmy dwie takie tafelki turmalinu, umieśćmy je jednę za drugą i rzućmy na nie wiązkę promieni słonecznych, a zobaczymy, że zależnie od wzajemnego względem siebie położenia tafelek, światło przechodzi przez nie, lub też zostaje zatrzymane. Gdy osie optyczne tafelek są do siebie równoległe (fig. 369, strona prawa), światło przechodzi przez obydwie tak, jak przez jedną taflę, o grubości, równej sumie ich grubości. Przy obracaniu jednej z tafelek, natężenie przechodzących promieni stopniowo słabnie

i wreszcie, gdy osie optyczne są do siebie prostopadłe (fig. 369, strona lewa), promienie te zostają zupełnie wygaszone. Doświadczenia podobne, również jak wiele innych, dotyczących światła spolaryzowanego, można z łatwością wykonywać za pomocą tak zwanych *cęgów turmalinowych* (fig. 370). Przyrząd ten składa się z dwóch tafelek turmalinu, wyciętych równolegle do osi kryształu, osadzonych w krążkach metalowych i przedstawiających *polaryzator* (*P*) i *analizator* (*A*). Krążki same objęte są przez pierścienie, stanowiące zakończenia sprężyny, skręconej w kształcie cęgów i ułatwiającej wzajemne zbliżanie tafelek; oprócz tego, krążki mogą być obracane wzdłuż obejmujących je pierścieni, co pozwala nadawać osiom turmalinu żądane położenia. Pomiędzy tafelkami umieszcza się dany przedmiot, który ma być rozpatrywany w świetle spolaryzowanem; przytrzymują go dosyć silnie ramiona cęgów. Użycie tego przyrządu, tak prostego i wygodnego zarazem, jest wszakże bardzo ograniczone przez to, że turmalin nadaje przechodzącemu przezeń światłu barwę żółto-brunatną lub brunatno-zieloną. Zamiast powyższego minerału, można użyć tafelki spatu islandzkiego, lub innego jakiego kryształu jednoosiowego; lecz spat ten przepuszcza, jak wiemy, promień zwyczajny i nadzwyczajny, co często przeszkadza oddzielnemu badaniu każdego z nich. Było więc bardzo pożądanem zbudowanie takiego analizatora, któryby dawał tylko jeden obraz i był zarazem przezroczysty dla drgań świetlnych różnej częstości. Zadanie to rozwiązał Nicol w sposób wielce dowcipny. Wyciął on mianowicie z kryształu spatu wapiennego czworoboczny pryzmat o podstawie romboedrycznej, którego przecięcie główne *a g d e* przedstawione jest na fig. 371 (str. 597). Następnie podzielił on ten pryzmat w kierunku *b c*, prostopadłym do głównego przecięcia, na



Fig. 370. Cęgi turmalinowe.

dwie części i po odpolerowaniu skleił je napowrót za pomocą balsamu kanadyjskiego tak, że stanowiły jak przedtem jeden pryzmat. Gdy na przednią ścianę *a e* tego ostatniego pada naturalny promień *m n*, wtedy po wejściu do kryształu dzieli się on na promień zwyczajny *n p* i nadzwyczajny *n o*. Spółczynnik załamania dla pierwszego z nich jest w takim stosunku do spółczynnika dla balsamu, że gdy promień ten pada bardzo ukośnie w miejscu zlepienia, wówczas ulega tam zupełnemu wewnętrznemu odbiciu i zostaje odrzucony na bok. Promień zaś nadzwyczajny w każdym razie przenika przez warstwę balsamu i wychodzi przez tylną płaszczyznę pryzmatu jako promień spolaryzowany *r s*, którego drgania odbywają się, jak przypuszczamy, w kierunku równoległym do głównego przecięcia. Pryzmat tedy Nicol'a, albo poprostu tak zwany nicol, nie przepuszcza wcale drgań prostopadłych do jego głównego przecięcia, a tylko równoległe do tegoż; użyty w podany sposób, przedstawia wyborny *polaryzator*, wiązka bowiem równoległych promieni, padająca na przednią ścianę, wychodzi przez tylną jako kompletnie spolaryzowana. Oprócz tego, nicol służy także jako *analizator*. Gdy mianowicie rzucimy na niego wiązkę światła naturalnego, wychodzi zeń zawsze spolaryzowana połowa tegoż światła, posiadająca stale jednakowe natężenie, niezależnie od położenia pryzmatu względem padających promieni. Lecz gdy na nicol pada światło już spolaryzowane, to przechodzi ono przezeń całkowicie tylko w tym razie, gdy płaszczyzna drgań jest równoległa do jego głównego przecięcia; przy wyprowadzaniu pryzmatu z tego położenia, natężenie przechodzącego światła stopniowo słabnie i wreszcie znika zupełnie, gdy płaszczyzna drgań staje się prostopadłą do głównego przecięcia.

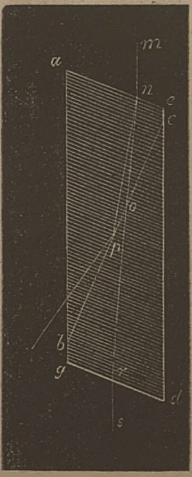


Fig. 371. Pryzmat Nicol'a.

W roku 1808 fizyk, imieniem Malus, obserwował przypadkowo przez kryształ spatu wapiennego zachodzące słońce i widział, jak przy obracaniu kryształu obadwa obrazy zmieniały

względne swe natężenie świetlne; gdy następnie badał bliżej te zjawiska, przyszedł do przekonania, że i przez odbicie pod pewnemi kątami światło może nabyć tych samych własności, jak po przejściu np. przez spat wapienny—t. j. może zostać spolaryzowane. W trzy lata potem Malus, Biot i Brewster znaleźli jednocześnie i niezależnie jeden od drugiego, że wskutek zwykłego załamania światło może także uledz spolaryzowaniu, jakkolwiek w małym tylko stopniu; wreszcie w tym samym czasie Arago odkrył barwną polaryzacyę. Zajmijmy się tedy bliższym nieco opisem tych faktów, zaczynając od pierwszego, a mianowicie od polaryzacyi przez odbicie.

Niechaj *R S* (fig. 372) przedstawia szklane zwierciadło nieamalgamowane, na które pada naturalny promień *a b*, odbijający się w kierunku *b c*. Jeżeli na drodze odbitego promienia *b c* umieścimy nicol, przekonamy się, że przy obracaniu tego ostatniego światło przezeń przechodzące posiada słabsze lub silniejsze natężenie, lecz w żadnem położeniu nie znika zupełnie. Według tego, cośmy wyżej powiedzieli, światło odbite *b c* nie jest tedy ani całkowicie naturalne, ani całkowicie spolaryzowane; uważamy je też za *częściowo spolaryzowane*, czyli za mięszaninę jednego i drugiego. Z części niespolaryzowanej przechodzi przez nicol zawsze połowa, niezależnie od jego położenia, część zaś spolaryzowana przechodzi lub nie, zależnie od tego, czy drgania odnośnego światła odbywają się w płaszczyźnie równoległej, czy też prostopadłej do głównego przecięcia pryzmatu. W pewnem położeniu nicola światło przechodzące przedstawia minimum natężenia, składa się ono bowiem w takim wypadku tylko z części niespolaryzowanej, a ponieważ ma to miejsce wtedy, gdy główne przecięcie pryzmatu leży w płaszczyźnie padania *a b c*, wnosimy z tego, że drgania światła spolaryzowanego, zawartego w promieniu odbitym *b c*, odbywają się w płaszczyźnie *d f l m*, prostopadłej do tamtej. Stosunek części niespolaryzowanej do spolaryzowanej w świetle odbitem zależy od kąta

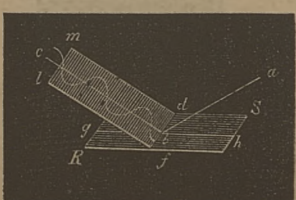


Fig. 372. Polaryzacya przez odbicie.

padania. I tak gdy promienie padają na zwierciadło prostopadle, w świetle odbitem niema wcale części spolaryzowanej, gdy natomiast kąt padania wynosi 57°, t. j. gdy promienie tworzą z powierzchnią *R S* kąt równy 33°, światło odbite jest całkowicie spolaryzowane. W tym razie kąt padania nazywa się *kątem polaryzacyi*. Malus wykazał, że prawie wszystkie zwierciadlane powierzchnie, z wyjątkiem metalowych, mogą spolaryzować światło, lecz że kąt polaryzacyi jest dla różnych ciał rozmaity. Dla wody wynosi on 53°, dla siarku węgla 59°, dla flintglasu 60°, z czego widzimy, że kąt polaryzacyi dla pewnej substancyi jest w ogóle tem większy, im większą jest jej zdolność załamująca, odnośnego wszakże prawa, związującego dwie te wartości, Malus nie zdołał wyśledzić. Dopiero Brewster odkrył, że istnieje bardzo prosty związek pomiędzy kątem polaryzacyi z jednej i spółczynnikiem załamania odbijającej substancyi z drugiej strony: śledząc mianowicie drogę promienia *I R* (fig. 373)

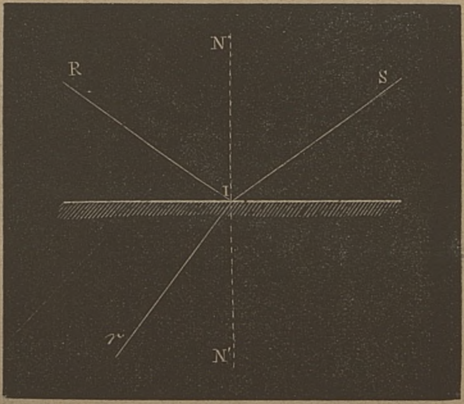


Fig. 373. Całkowicie spolaryzowany promień odbity tworzy z promieniem załamanym kąt prosty.

w taki sposób odbitego, że ulega zupełnej polaryzacyi, oraz drogę promienia załamanego *I r*, który przeniknął do wnętrza ciała odbijającego, znajdujemy, że dwa te promienie stanowią pomiędzy sobą kąt prosty. Prawo Brewster'a może służyć jako nowy sposób oznaczania spółczynnika załamania; można się nim z wielką korzyścią posługiwać szczególniej wtedy, gdy chodzi o ciała mało przezroczyste, do których nie daje się zastosować metoda pryzmatyczna (str. 466). Podobnie bowiem jak znając kąt załamania *N′ I r*, łatwo znaleść kąt polaryzacyi, tak naodwrót także z wielkości tego ostatniego można obliczyć kąt załamania. W taki np. sposób znaleziono spółczynnik załamania dla węgla kamiennego, dla rogu i innych ciał nieprzezroczystych. Dodajmy

jeszcze, że z przyczyny niejednakowych spółczynników załamania dla promieni różnej barwy, ich kąty polaryzacyi są rozmaite, jakkolwiek w nieznacznym tylko stopniu. Dlatego też białe światło nie może nigdy wskutek odbicia uledz *całkowitej* polaryzacyi, ulega jej tylko jedna ze składowych jednorodnych barw, inne zaś są tylko mniej lub więcej zbliżone do stanu zupełnego spolaryzowania.

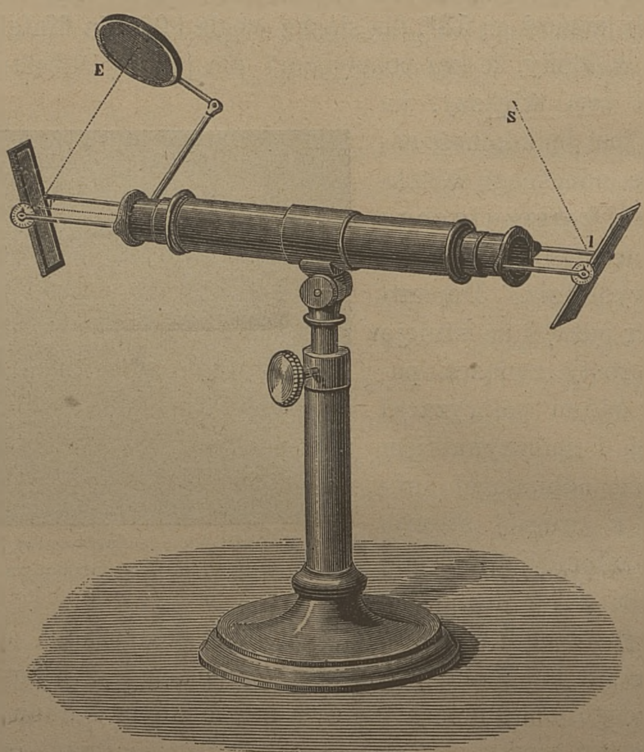


Fig. 374. Przyrząd polaryzacyjny, ulepszony przez Biot'a.

Zobaczmy teraz, jak urządzonym jest przyrząd polaryzacyjny, oparty na odbijaniu się światła. Ponieważ, jak widzieliśmy, zwierciadło szklane, do powierzchni którego promienie są nachylone pod kątem 33⁰, odbija tylko oscylacye o kierunku prostopadłym do płaszczyzny padania, to może ono stanowić doskonały polaryzator: drugie zaś takie samo zwierciadło, może od-

grywać rolę analizatora. Gdy mianowicie obadwa zwierciadła są do siebie równoległe, wtedy promień odbity od jednego z nich i zupełnie spolaryzowany, odbija się jako taki i od drugiego zwierciadła, albowiem drgania jego odbywają się prostopadle do wspólnej w tym razie dla obu zwierciadeł płaszczyzny padania. Przy obracaniu zaś drugiego zwierciadła w taki sposób, ażeby powierzchnia jego z padającym na nią promieniem zawsze tworzyła ten sam co poprzednio kąt, światło od niego odbite traci coraz bardziej na natężeniu i wreszcie zupełnie znika, gdy płaszczyzny padania obu zwierciadeł są do siebie prostopadłe. W tym ostatnim wypadku promień, padając na drugie zwierciadło, drga w samej jego płaszczyznie padania i dlatego nie może być przez nie odbite.

Bardzo wygodny przyrząd polaryzacyjny przedstawiony jest na fig. 374 (str. 600). Promień świetlny $S\,I$ pada najprzód na zwierciadło I z czarnego szkła, od którego się odbija w kierunku $I\,I'$ wzdłuż osi wewnątrz poczernionej rury, następnie pada na drugie zwierciadło I', od którego powtórnie się odbija ku naszemu oku albo ku ekranowi E. Rurę przyrządu, również jak i zwierciadło, można dowolnie nachylać, a także obracać wraz z podtrzymującemi je pierścieniami naokoło osi rury, co pozwala podług życzenia zmieniać kierunek padających promieni. Za pomocą tego przyrządu z łatwością przekonywamy się, że największa ciemność następuje wtedy, gdy na obu zwierciadłach kąt odbicia wynosi 57^0 i gdy jednocześnie ich płaszczyzny padania są do siebie prostopadłe, największa zaś jasność—gdy płaszczyzny te są równoległe. Należy jeszcze nadmienić, że w danym razie zwierciadła amalgamowane są niekorzystne dlatego, że przy żadnym kącie padania nie odbijają światła zupełnie spolaryzowanego.

Bardziej znanym od poprzedniego jest przyrząd polaryzacyjny Nörremberga (fig. 375, str. 602). Szklana przezroczysta tafla $C\,D$, nachylona do pionowej osi przyrządu pod kątem 33^0, stanowi polaryzator; promienie padające w kierunku $m\,n$ odbijają się i jako zupełnie spolaryzowane $n\,c$ biegną ku dołowi, gdzie znów się odbijają od amalgamowanego zwierciadła c, prze-

chodzą przez taflę $C\ D$ i padają na analizator $C'\ D'$ z czarnego szkła. Ten ostatni jest podtrzymywany przez dwa słupki a' i b', które z kolei opierają się na ruchomym pierścieniu i, dającym się obracać wzdłuż stałego, podzielonego na stopnie pierścienia K. Gdy zero tego ostatniego schodzi się ze wskaźnikiem i ruchomego pierścienia, wtedy płaszczyzny padania dla zwierciadła $C'\ D'$ i tafli $C\ D$ są równoległe pomiędzy sobą. Na figurze wskaźnik ten stoi naprzeciw podziałki 90°, co znaczy, że owe płaszczyzny są wzajemnie prostopadłe i dlatego też promień przychodzący od dołu w górze wcale się nie odbija.

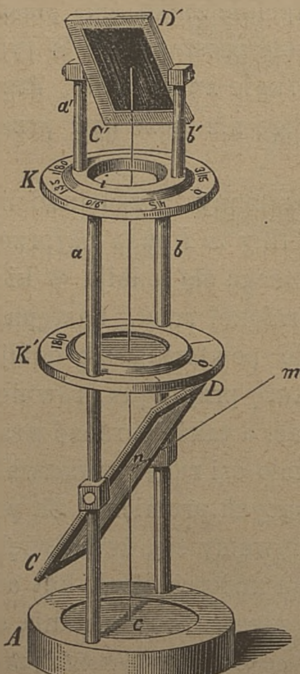


Fig. 375. Przyrząd polaryzacyjny Nörremberga.

Promienie, które będąc pochylone do tafli szklanej, przechodzą przez nią, okazują się także częściowo spolaryzowanemi, jak o tem można się przekonać za pomocą pryzmatu Nicol'a. Drgania w ten sposób spolaryzowanych promieni odbywają się w samej płaszczyznie padania, a więc w kierunku, prostopadłym do kierunku drgań światła spolaryzowanego przez odbicie. To ostatnie, jak wiemy, może przy pewnym kącie padania uledz całkowitej polaryzacyi, światło zaś załamane ulega jej tylko częściowo, niezależnie od kąta padania.

W końcu wspomnimy jeszcze o kilku zastosowaniach, jakie polaryzacya światła znalazła w naukach przyrodniczych, zastosowaniach wykazujących, że zjawiska, które z początku zdają się przedstawiać interes wyłącznie teoretyczny, mogą się w następstwie okazać bardzo pożytecznemi także dla wymagań praktyki. Na zasadzie prawa Malus'a o zmienności natężenia dwóch obrazów, otrzymywanych

przez kryształ podwójnie załamujący, Arago zbudował przyrząd, za pomocą którego łatwo można porównać natężenie dwóch źródeł światła. Ten sam uczony podaje dalej prosty sposób uwidoczniania mielizn i ostrych skał, ukrytych pod powierzchnią morza i trudnych do zobaczenia z powodu blasku jego; sposób polega na tem, że spogląda się na powierzchnię morza przez pryzmat Nicol'a, którego przecięcie główne jest prostopadłe do jej poziomu, wtedy bowiem promienie światła, odbite od wody, ulegają pochłonięciu, promienie zaś od przedmiotów podwodnych, załamane przy przejściu z wody do powietrza, dochodzą do naszego oka, pozwalając je widzieć dokładnie. Polaryzacya ułatwia nam poznanie, czy światło przychodzące do nas od odległego ciała niebieskiego, jest przezeń samo wysyłane, czy też tylko odbite od jego powierzchni. I tak dowiedziono z pewnością, że księżyc i inne planety wysyłają do nas jedynie światło, zapożyczone od słońca; również światło jądra komet częściowo przynajmniej jest tylko odbitem światłem słonecznem, jak tego zdają się dowodzić rezultaty badań wielu obserwatorów nad płaszczyzną jego polaryzacyi. Wreszcie znaleziono także, że światło tęczy jest spolaryzowane.

§ 4. Interferencya przez podwójne załamanie.

Kombinacya z dwóch nicolów, dających się obracać wokoło wspólnej osi, wybornie się nadaje do bliższego badania zjawisk polaryzacyi; w kombinacyi tej jeden z pryzmatów służy jako polaryzator, drugi zaś jako analizator.

Jeżeli ich przecięcia główne są do siebie równoległe, wtedy promień świetlny, wychodzący z pierwszego z nich, przenika także przez drugi i na przeciwległym ekranie pojawia się jasna plama. Gdy zaś drugi pryzmat odchylimy na 90°, to jest gdy skrzyżujemy nicol'e, promień przejdzie przez polaryzator, lecz zostanie zatrzymany przez drugi pryzmat-analizator, albowiem obadwa przepuszczają tylko, jak wiemy, drgania równoległe do ich głównego przecięcia; na ekranie panuje wtedy zupełna ciemność. Umieśćmy teraz pomiędzy dwoma skrzyżowanemi nicolami

tafelkę z jakiejś substancyi, pojedyńczo załamującej światło, np. ze szkła lub soli kamiennej, a zobaczymy, że owa ciemność na ekranie panuje stale, niezależnie od położenia tafelki. Inaczej rzeczy się mają przy użyciu substancyi, podwójnie załamującej światło, np. spatu wapiennego: tafelka z tego materyału, wstawiona pomiędzy dwa skrzyżowane nicol'e i obracana wokoło kierunku padających promieni, znosi panującą na ekranie ciemność lub pozostawia takową, zależnie od swego położenia. Zobaczmy tedy, jak nauka o polaryzacyi objaśnia to zjawisko. Niechaj linia *M N* (fig. 376) wyobraża kierunek głównego przecięcia pierwszego pryzmatu, linia zaś *P Q*—kierunek takiegoż przecięcia drugiego. Jeżeli przecięcie główne tafelki spatu wapiennego, umieszczonej pomiędzy obydwoma, jest równoległe do *P Q*, wtedy wychodzące z polaryzatora promienie, których drgania zachodzą w kierunku *M N*, ulegają w tafelce, jako prostopadłe do jej gł. przecięcia, zwyczajnemu tylko załamaniu i niezmienione pod względem płaszczyzny drgań padają na analizator, który ich oczywiście nie przepuszcza. Gdy zaś przecięcie główne tafelki jest równoległe do *M N*, wtedy promienie, po wyjściu z polaryzatora, załamują się w tafelce tylko nadzwyczajnie, jako biegnące równolegle do jej gł. przecięcia, znów niezmienione pod względem płaszczyzny drgań padają na analizator i tak samo jak poprzednio zostają przezeń zatrzymane. Lecz gdy przecięcie główne tafelki zajmuje położenie nierównoległe ani do *M N*, ani do *P Q*, np. *R S*, wtedy opuszczający pierwszy nicol promień o drganiach, odbywających się w kierunku *M N*, a więc w kierunku, pochyłym do tegoż przecięcia, nie przechodzi przez tafelkę wyłącznie jako promień zwyczajny, ani też wyłącznie jako nadzwyczajny. Drgania jego bowiem rozkładają się na drgania w kierunku *R S* (przecięcie główne), które przechodzą przez tafelkę jako promień nadzwyczajny oraz w kie-

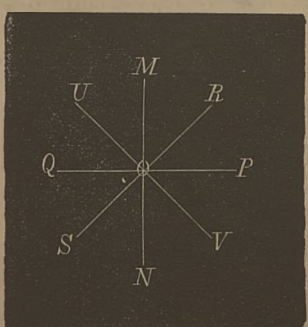


Fig. 376. Szemat rozkładania się drgań.

runku *U V* (prostopadle do przecięcia głównego), przechodzące przez nią jako promień zwyczajny. Dwa te promienie, to jest zwyczajny i nadzwyczajny, padają na drugi nicol, który, jak wiemy, przepuszcza jedynie drgania, zachodzące w płaszczyznie głównego jego przecięcia. Tu drgania promienia *nadzwyczajnego*, odbywające się w kierunku *R S*, rozkładają się powtórnie na drgania w płaszczyznie *M N* i drgania w płaszczyznie *P Q*. To samo dzieje się z promieniem *zwyczajnym*, którego drgania zachodzą w kierunku *U V* i padają na drugi nicol; i te rozkładają się w nim na drgania w płaszczyznie *M N* oraz drgania w płaszczyznie *P Q*. Drgania w kierunku *M N*, stanowiące, jak widzimy, składową część zarówno promienia nadzwyczajnego, jak i zwyczajnego, zostają zatrzymane przez drugi nicol, jako prostopadłe do jego głównego przecięcia. Drgania zaś w kierunku *P Q*, stanowiące drugą składową część promienia nadzwyczajnego i zwyczajnego, jako równoległe do gł. przecięcia drugiego nicol'a, przechodzą przez takowy i wytwarzają właśnie na ekranie jasną plamę. Reasumując wyniki powyższego doświadczenia powiemy, że tafelka z podwójnie załamującej światło substancyi, umieszczona pomiędzy dwoma skrzyżowanemi nicol'ami, *tylko wtedy* nie zmienia w niczem ciemności, panującej na przeciwległym im ekranie, gdy stoi równolegle do głównego przecięcia jednego z nich; w każdem innem zaś położeniu powoduje mniejszą lub większą jasność [1]. Podobne zachowanie się danej tafelki zdradza napewno jej własność podwójnego załamywania światła.

Jeden z dwóch promieni, wychodzących z analizatora i drgających w kierunku głównego przecięcia tegoż *P Q*, stanowi tedy, jak widzieliśmy, składową część promienia zwyczajnego, drugi zaś—nadzwyczajnego. Każda z nich przebywa więc tafelkę z inną prędkością, a różnica w drodze przebytej jest tem większa, im grubszą jest ta tafelka. Promienie te, drgające w tej samej płaszczyznie, mogą powodować zjawiska interferencyi,

---

[1] Pod warunkiem, że nie jest wycięta prostopadle do osi optycznej kryształu.

która, jak wiemy, przy pewnych warunkach objawia się wspaniałemi barwami. Do tego rodzaju doświadczeń nad interferencyą światła spolaryzowanego, lepiej aniżeli spat wapienny nadaje się dwuosiowy gips krystaliczny, który z łatwością daje się łupać na bardzo cienkie tafelki. Podobna tafelka, umieszczona pomiędzy dwoma *skrzyżowanemi* nicol'ami, *równolegle* do jednego z głównych przecięć, nie zmienia w niczem ciemności, panującej w danej chwili na ekranie. Przy każdem innem zaś położeniu, to jest gdy przecięcie główne tafelki jest nachylone do takiegoż przecięcia polaryzatora lub analizatora, na ekranie pojawia się światło, którego natężenie zależy od wielkości kąta nachylenia tafelki. Gdy światło, użyte do doświadczenia, jest białe, na ekranie pojawia się barwa jednorodna. Przy wyprowadzaniu drugiego nicol'a ze skrzyżowanego położenia, barwa ta słabnie i wreszcie, gdy przecięcia główne obu nicol'ów stanowią pomiędzy sobą kąt równy 45^{0}, przechodzi w barwę białą. Przy dalszem odchylaniu biel ta zamienia się znów stopniowo w inną barwę jednorodną, która przy wzajemnie równoległem położeniu obu nicol'ów staje się dopełniającą do tej barwy jednorodnej, jaka występowała, gdy nicol'e były skrzyżowane. I tak np., jeżeli wspomniana tafelka gipsowa, znajdując się pomiędzy skrzyżowanemi nicol'ami, przedstawia barwę czerwoną, to przy równoległem ich położeniu wydaje się zieloną. Zjawisko to nie trudno jest objaśnić. Wyobraźmy sobie mianowicie, że promień, wychodzący z pierwszego nicol'a, pada w punkcie O na tafelkę (fig. 376) i w danej chwili nadaje znajdującej się tutaj cząstce eteru ruch ku górze, t. j. w kierunku OM. Drgający ruch ten wewnątrz tafelki, której przecięcie główne zajmuje położenie RS, rozkłada się na drganie w płaszczyznie tegoż przecięcia, t. j. w kierunku OR oraz na drgania w płaszczyznie, prostopadłej do tegoż przecięcia, czyli w kierunku OU. Gdy ruchy te dochodzą do drugiego nicol'a, każdy z nich rozkłada się tutaj powtórnie, a mianowicie OR—na ruch OM, t. j. w płaszczyznie prostopadlej do głównego przecięcia analizatora i na ruch OP w płaszczyznie tegoż przecięcia. Drugi ruch, to jest ten, który zachodzi wzdłuż OU, rozkłada się podobnie na ruch OM,

t. j. w płaszczyznie, prostopadłej do głównego przecięcia analizatora oraz na ruch $O\ Q$ w płaszczyznie tegoż przecięcia. Zauważmy tedy, że podczas gdy drgania w płaszczyznie $M\ N$, będące rezultatem rozkładu dwóch promieni, przychodzących z tafelki, odbywają się jednocześnie w tę samą stronę, t. j. ku górze ($O\ M$), drgania natomiast w płaszczyznie $P\ Q$, również stanowiące rezultat rozkładu dwóch promieni, wychodzących z tafelki, odbywają się jednocześnie w strony wprost przeciwne, a mianowicie od jednego na prawo ($O\ P$), od drugiego zaś na lewo ($O\ Q$). Wiemy zaś, że takie dwa impulsy jednocześnie nadane cząstce eteru i skierowane w strony wprost przeciwne, powodują różnicę faz, wynoszącą pół-fali. Innemi słowy, jeżeli przez przyrząd polaryzacyjny przechodzą drgania w płaszczyznie $M\ N$, t. j. gdy analizator ustawiony jest równolegle do polaryzatora, pierwszy nie powoduje żadnej różnicy faz wychodzących z niego promieni, gdy zaś jest z polaryzatorem skrzyżowany, t. j. gdy wychodzą zeń drgania w płaszczyznie $P\ Q$, powoduje on różnicę, wynoszącą pół-fali.

Jeżeli tafelka gipsowa oświecona światłem białem, umieszczona pomiędzy polaryzatorem i analizatorem, ma taką grubość, że wychodzące z niej dwa składowe promienie opóźniają się jeden względem drugiego o nieparzystą liczbę pół-fali dla pewnej określonej barwy np. czerwonej i jeżeli przytem analizator jest równoległy do polaryzatora, barwa ta zostaje wygaszoną; na ekranie pojawia się wtedy tylko zieleń, to jest to, co pozostaje w świetle białem po wygaszeniu czerwieni. Po skrzyżowaniu obu nicol'ów, do powyższej różnicy faz, spowodowanej li tylko przez tafelkę, przybywa jeszcze różnica pół-fali wskutek opisanego wyżej działania analizatora tak, że wynosi ona obecnie dla barwy czerwonej parzystą liczbę pół-fal, dla zielonej zaś nieparzystą, wskutek czego zielone promienie zostają teraz wygaszone, czerwone natomiast wzmacniają się wzajemnie i nadają tafelce tę właśnie barwę.

Jeżeli do powyższych doświadczeń używa się wiązki promieni równoległych i gdy tafelka posiada wszędzie jednakową grubość, wtedy wszystkie promienie mają do przebycia w niej

drogi jednakowe, a każda para składowych promieni, drgających w tej samej płaszczyznie ($M\ N$ albo $P\ Q$), odznacza się tą samą różnicą faz. Tafelka tedy jednostajnie gruba, rozpatrywana w równoległem świetle spolaryzowanem, przedstawia w danej chwili tylko jednę barwę. W spolaryzowanem zaś świetle, zebranem przez soczewkę, zjawisko jest zupełnie inne. Ażeby otrzymać takie światło, zbiera się za pomocą soczewki wypukłej L (fig. 377) promienie słoneczne, a wychodzący z niej zbieżny stożek świetlny przepuszcza przez kryształ K spatu wapiennego, odgrywający rolę polaryzatora, gdzie ulega podwójnemu załamaniu. Stożek nadzwyczajnych promieni zostaje zatrzymany przez przegrodę S, stożek zaś zwyczajnych przechodzi, pada na umieszczoną w blizkości jego wierzchołka tafelkę krystaliczną P, podlegającą doświadczeniu i po przejściu przez nią, oraz przez drugą soczewkę wypukłą L', rzucającą dany obraz interferencyjny na ekran, dosięga analizatora N. Tafelka, wycięta z jednoosiowego kryształu *prostopadle do jego osi optycznej* i umieszczona pionowo w zebranem świetle spolaryzowanem, powoduje nader ciekawe zjawiska. Promień, który stanowi oś stożka świetlnego, pada na tafelkę prostopadle, przebywa ją tedy wzdłuż jej osi optycznej, nie ulegając podwójnemu załamaniu. Inne zaś promienie ulegają takiemu załamaniu i to tem silniej, im dalej biegną od osi, to jest im ukośniej padają na tafelkę; oprócz tego, w miarę coraz bardziej ukośnego padania, przebywają także w tafelce coraz to większe drogi. Oddalając się tedy od osi stożka, napotykamy stopniowo ciągle większe różnice w drodze, przebytej wewnątrz tafelki przez dwa składowe promienie, z których jeden jest zwyczajny, drugi zaś nadzwyczajny, a więc które przebiegają ją z różną prędkością. Ma to miejsce symetrycznie wokoło osi optycznej tak, że w danej chwili wszystkie elementy koła, zakreślonego na ekranie z punktu, leżącego

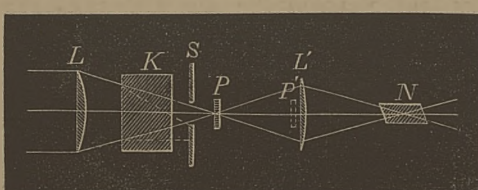


Fig. 377. Szemat przyrządu do otrzymania zebranego światła spolaryzowanego.

KSIĘGARNIA NAKŁADOWA

H. OLAWSKIEGO

Mazowiecka Nr. 6,

POLECA:

HISTORYĘ NATURALNĄ

D-ra G. Hayeka,

zawierającą 72 tablic zoologicznych z 845 kolorowanemi figurami, 40 tablic botanicznych z 445 kolorowanemi figurami i 8 mineralogicznych z 75 figurami. — Cena kompletu Rs. **18**; w ozdobnej oprawie Rs. **22**.

Także do nabycia (tak długo jak zapas starczy)

w 30-tu zeszytach po kopiejek **60**.

Autorowi dzieła *przyznano* na wystawie w Tryeście w r. 1882 **złoty medal** w dziale sztuk i nauk.

HISTORYĘ POWSZECHNĄ

BECKERA,

w przekładzie dopełnionym i uzupełnionym

w epoce dziejów najnowszych,

pod redakcyą **M. Wołowskiego,** w 12 tomach po Rs. **1** kop. **10** za tom (oprawne tomy zawierające po 2 tomy po Rs. **2** kop. **50**) lub w zeszytach po kop. **10**.

GEOGRAFJĘ POPULARNĄ

czyli

Ziemia w malowniczych obrazach.

Opisy najciekawszych krajów, ludów i miejscowości według najnowszych źródeł i najcelniejszych autorów, opracował

Dr. Wł. Wicherkiewicz,

z mapkami i drzeworytami, w 53-ch zeszytach po kop. **15**.

Podręczniki do nauki języków obcych

(Z WYMOWĄ)

podług metody **D-ra H. Loewego.**

JĘZYK FRANCUZKI

ze słownikiem

francuzko-polskim i polsko-francuzkim,

komplet w 25 zeszytach

po 15 kop.

JĘZYK NIEMIECKI

ze słownikiem

polsko-niemieckim i niemiecko-polskim,

komplet w 25 zeszytach

po 15 kop.

Roznosiciele mają Prospekty i Zeszyty na okaz!

Roznosiciele mają Prospekty i Zeszyty na okaz!

Дозволено Цензурою, Варшава 21 Апрѣля 1889 г.

Druk Jana Cotty w Warszawie, Senatorska 29.

Cena 20 kop.

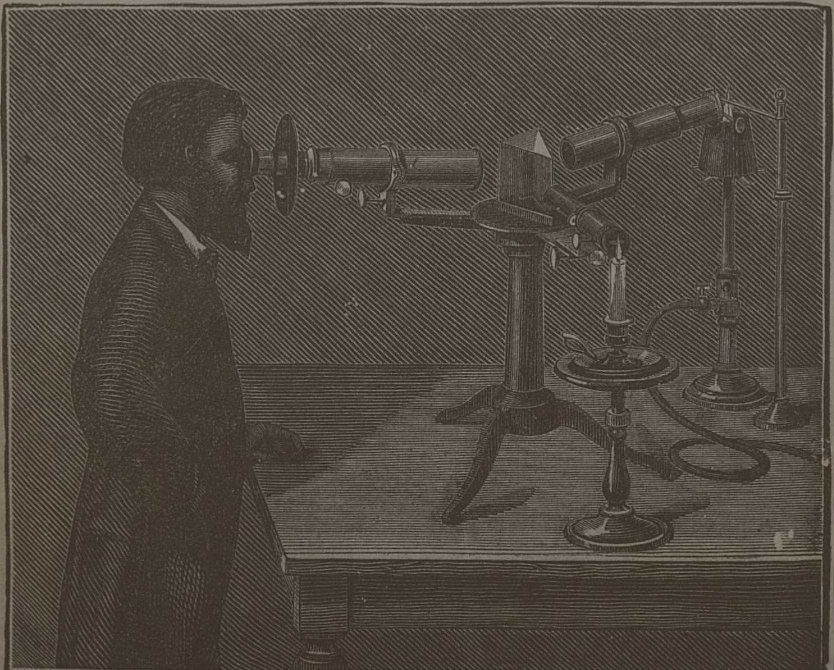
Zeszyt 20.

Cena 20 kop.

SIŁY PRZYRODY.

POPULARNY WYKŁAD FIZYKI

I GŁÓWNIEJSZYCH JEJ ZASTOSOWAŃ.



Spektroskop.

Podług dzieła A. Guillemin'a „Le monde physique"

OPRACOWALI

Józefowa Nusbaum

bak. n. prz.

i

Henryk Silberstein

dr. fil., b. as. chem. przy un. w Bernie.

WARSZAWA.

Nakładem Księgarni **H. Oławskiego**, ul. Mazowiecka № 6.

1889.

na przedłużeniu osi, drgają jednakowo, lecz w każdem kole inaczej. Dlatego też na ekranie, przy użyciu światła białego, pojawia się system współśrodkowych barwnych pierścieni, który przy skrzyżowaniu polaryzatora i analizatora przecięty jest ciemnym krzyżem (patrz tablicę p. t. „Pierścienie barwne“, pierwszy rysunek z lewej strony). Powstawanie jego tłómaczy się w sposób następujący. Ponieważ, jak już wspominaliśmy, optyczna oś tafelki jest prostopadła do jej powierzchni, to—na mocy pewnych danych geometrycznych—każda z linij $M N$, $P Q$, $R S$ i $U V$ (fig. 376), poprowadzonych na ekranie przez środek pierścieni, odpowiada jednemu z jej głównych przecięć. Promienie, które wychodzą z polaryzatora i drgają równolegle do $M N$, a więc prostopadle do $P Q$, przechodzą nierozszczepione przez główne przecięcie $M N$ tafelki jako nadzwyczajne, oraz przez takież jej przecięcie $P Q$ jako zwyczajne. Gdy drgania te dochodzą do analizatora, skrzyżowanego z polaryzatorem, zostają przezeń zatrzymane, albowiem analizator przepuszcza tylko drgania, zachodzące w samej płaszczyznie jego głównego przecięcia $P Q$. Dlatego też na ekranie pojawia się ciemny krzyż, którego ramiona są odpowiednio równoległe do płaszczyzny drgań polaryzatora i analizatora. W każdem zaś głównem przecięciu tafelki, nachylonem do takiegoż przecięcia polaryzatora, np. w $R S$, promienie ulegają najprzód rozszczepieniu w tafelce, następnie w analizatorze; wychodzące z tego ostatniego drgania w płaszczyznie $P Q$ interferują ze sobą i dają początek pierścieniom (patrz wyżej). Jeżeli analizator jest równoległy do polaryzatora, wtedy zamiast czarnego, pojawia się biały krzyż, przyczem barwy pierścieni stają się dopełniającemi do barw w poprzednim wypadku (patrz wymienioną tablicę, trzeci rysunek z lewej strony). Rysunek środkowy pomiędzy dwoma opisanemi odpowiada nachyleniu analizatora do polaryzatora, wynoszącemu 45°. Gdy Brewster badał owe barwne pierścienie, zauważył pewną znaczną różnicę pod względem zachowania się rozmaitych minerałów. I tak np. rubin, szmaragd, spat wapienny, dawały tylko pojedyńczy system pierścieni, inne zaś, jak topaz i saletra (azotan potasu), wycięte w określonym kierunku, tworzyły po-

dwójny system pierścieni, naprzemian to jasnych, to ciemnych, albo też różnobarwnych, zależnie od tego, czy używano światła jednorodnego, czy białego. Zjawiska te właśnie doprowadziły Brewster'a do wniosku, zupełnie sprawdzonego obserwacyą i doświadczeniem, że muszą istnieć kryształy o jednej i o dwóch osiach optycznych. Wyciąwszy np. tafelkę z dwuosiowego kryształu saletry w taki sposób, ażeby płaszczyzny jej były prostopadłe do linii, przepoławiającej ostry kąt pomiędzy dwiema optycznemi osiami i umieściwszy tafelkę tę w przyrządzie polaryzacyjnym, otrzymujemy piękne figury, przedstawione po prawej stronie wymienionej tablicy, odpowiadające rozmaitemu położeniu jej głównego przecięcia odnośnie do polaryzatora i analizatora.

Interesującym jest fakt, że ciała, pojedyńczo załamujące światło, mogą w pewnych warunkach stać się podwójnie załamującemi. Tafelka szklana, umieszczona w miejscu P' przyrządu polaryzacyjnego, przedstawionego na fig. 377 (str. 608), którego polaryzator i analizator są z sobą skrzyżowane, nie zmienia, jak wiemy, nic w ciemności panującej wtedy na ekranie. Lecz gdy tafelkę tę za pomocą aparatu szrubowego ściskamy w kierunku od góry ku dołowi, wtedy układ jej cząstek nie jest już jak przedtem, ze wszech stron jednakowy. Na ekranie pojawia się jasny obraz tafelki, przecięty ciemnym krzyżem, co dowodzi, że, dzięki wywieranemu na nią ciśnieniu, nabrała ona własności podwójnego załamywania światła. Własności takiej szkło stale nabywa także przez silne ogrzanie i natychmiastowe szybkie oziębienie. Podobne zjawiska dowodzą, jak słusznem jest przypuszczenie o ścisłej zależności, istniejącej pomiędzy układem cząstek danej substancyi a jej działaniem na przechodzące światło.

§ 5. Polaryzacya obrotowa.

Widzieliśmy w poprzednim §, że tafelka, wycięta z jednoosiowego kryształu prostopadle do jego osi optycznej i umieszczona pionowo pomiędzy dwoma nicol'ami, przepuszcza promienie,

wychodzące z pierwszego, nie zmieniając ich wcale, albowiem biegną one wtedy wzdłuż jej osi optycznej. Przy obracaniu drugiego nicol'a, na ekranie występuje wtedy ciemność lub jasność, zupełnie tak samo, jak gdyby tafelki owej wcale nie było. Stosuje się to do wszystkich jednoosiowych kryształów, za wyjątkiem kwarcu. Tafelka wycięta w powyższy sposób z kryształu tego minerału i wstawiona pomiędzy dwa nicol'e, zachowuje się zupełnie odmiennie. Przy obracaniu mianowicie drugiego nicol'a, obraz na ekranie zmienia tylko swą barwę (jeżeli do doświadczenia użyto światła białego), lecz w żadnem jego położeniu nie znika zupełnie; kolejno pojawiające się barwy: czerwona, pomarańczowa, żółta, zielona, niebieska i fioletowa stopniowo przechodzą jedna w drugą i powtarzają się w wymienionym porządku, jeżeli obracamy analizator ciągle w tym samym kierunku. Badając za pomocą pryzmatu jednobarwne światło, wychodzące w danej chwili z analizatora, przekonywamy się, że nie jest ono jednorodnem, lecz składa się z wielu barw. I tak np. wychodzące światło zielone, po przepuszczeniu przez pryzmat daje widmo, w którem zupełnie brak czerwieni, wszystkie inne natomiast barwy tęczowe są obecne. Przy dalszem obracaniu analizatora w tym samym kierunku, w widmie owem znika kolejno każda z wymienionych barw, przyczem po wygaśnięciu fioletu przychodzi powtórnie kolej na czerwień i t. d. To nam pokazuje, że jednobarwne światło, pojawiające się na ekranie bez udziału pryzmatu, składa się w danej chwili z wszystkich barw światła białego, za wyjątkiem tej, która uległa wygaszeniu przy przejściu przez przyrząd polaryzacyjny.

Wiemy, że gdy nicol'e w przyrządzie tym są skrzyżowane, wtedy wszystkie promienie, wychodzące z pierwszego i drgające równolegle do jego głównego przecięcia, zostają zatrzymane przez drugi nicol, jako prostopadłe do głównego przecięcia tego ostatniego, na ekranie zaś panuje wtedy zupełna ciemność. Wstawmy teraz pomiędzy skrzyżowane nicol'e znaną nam już tafelkę kwarcu, której grubość niechaj się równa 3,75 milimetra i rzućmy na polaryzator światło białe. Jeżeli chcemy, ażeby w świetle tem, po przejściu jego przez tafelkę i analizator, zo-

stały wygaszone np. promienie czerwone, musimy ten ostatni odchylić na 60° ze skrzyżowanego położenia, to znaczy, że po takiem dopiero odchyleniu drgania promieni czerwonych odbywają się prostopadle do głównego przecięcia analizatora. Ponieważ drgania w promieniach czerwonych, *po wyjściu ich z polaryzatora*, podobnie jak wszystkie inne, zachodzą prostopadle do głównego przecięcia analizatora, a po przejściu ich przez tafelkę należało dla ich wygaszenia odchylać ten ostatni ze skrzyżowanego położenia na 60°, wynika z tego, że *tafelka kwarcu skręca płaszczyznę drgań dla promieni czerwonych na 60°.* W podobny sposób znajdujemy, że płaszczyzna drgań dla promieni żółtych ulega w tejże tafelce skręceniu na 90°, dla fioletowych zaś—na 195°. Liczebne te dane odnoszszą się do tafelki, mającej, jakeśmy to zaznaczyli, grubość 3,75 milim. Przy użyciu innych tafelek, kąty, na jakie zostaje skręcona płaszczyzna drgań dla rozmaitych jednorodnych promieni, różnią się od powyżej przytoczonych i wzrastają w tym samym stosunku, w jakim powiększa się grubość tafelki.

Pewne okazy kwarcu zachowują się w taki sposób, że wycięta z nich tafelka skręca płaszczyznę drgań dla oddzielnych barw na prawo, to znaczy, że chcąc je kolejno—począwszy od czerwieni i skończywszy na fiolecie—gasić, należy obracać analizator w kierunku strzałki zegarowej, czyli z lewa na prawo; kwarc taki należy do ciał *prawoskręcających.* Inne zaś gatunki tego minerału skręcają płaszczyznę drgań na lewo, czyli że należy wtedy analizator obracać w kierunku przeciwnym, niż w poprzednim wypadku; jestto kwarc *lewoskręcający.*

Postarajmy się teraz bliżej objaśnić opisane tutaj zjawiska skręcania płaszczyzny drgań; dla uczynienia tego, musimy jednak poprzednio zaczerpnąć z mechaniki pewne dane co do rezultatów kombinacyi dwóch ruchów drgających, skierowanych w strony wzajemnie prostopadłe. Niechaj *A Q* (fig. 378, str. 613) przedstawia wahadło, zakończone u dołu ostrzem, które w stanie spoczynku wskazuje punkt *O*. Przez ten ostatni przechodzą dwie wzajemnie prostopadłe linie *A B* i *C D*. Gdy spoczywające wahadło uderzamy w kierunku *O A*, wtedy wykonywa

ono oscylacye wzdłuż linii *A B*; uderzone zaś w kierunku *O C*, drga wzdłuż linii *C D*, przyczem czas użyty na jednę oscylacyę, zależny, jak wiemy, tylko od długości wahadła, pozostaje niezmieniony, niezależnie od jej kierunku.

Jakiż tedy ruch wykonywałoby wahadło pod jednoczesnym wpływem dwóch tych uderzeń, skierowanych w strony wzajemnie prostopadłe? Ażeby to rozstrzygnąć, nadajmy mu ruch w kierunku *A B* i w chwili, gdy zajmie położenie *A*, uderzmy je w kierunku prostopadłym do tamtego, t. j. *A a* z taką siłą, że gdyby poruszało się tylko w tym ostatnim kierunku, to oddaliłoby się pod wpływem tej siły od punktu *A* na odległość równą *O A*. Wahadło opisuje wtedy koło *A C B D A* w kierunku, wskazanym przez strzałki, przyczem czas, użyty na przebycie tego koła, jest równy czasowi jednego zwykłego wahnięcia. Ponieważ wahadło otrzymało uderzenie w kierunku *A a* w chwili, gdy znajdowało się w punkcie *A*, to jest gdy wykonało już jednę czwartą oscylacyi wzdłuż *A B*, możemy powiedzieć, że dwa drgające prostolinijne ruchy o jednakowej amplitudzie drgań, odbywające się w kierunkach wzajemnie prostopadłych, będąc połączone, wytwarzają ruch kołowy, jeżeli jeden z tych ruchów wyprzedza drugi o ćwierć oscylacyi. W danym wypadku ruch kołowy wahadła odbywa się w kierunku strzałki zegarowej, czyli z lewa *na prawo*; gdyby uderzenie skierowane było w stronę przeciwną *A a*, wahadło poruszałoby się z prawa *na lewo*. Wreszcie będąc uderzone w kierunku *O C* w chwili, gdy przechodzi przez położenie równowagi *O*, poczyna ono znów wykonywać oscylacye wzdłuż prostej linii, lecz nie w kierunku *O A*, ani też *O C*, ale pośrednim pomiędzy niemi. W tym wypadku różnica faz obu ruchów albo równa się zeru, albo też wynosi parzystą liczbę pół-oscylacyi.

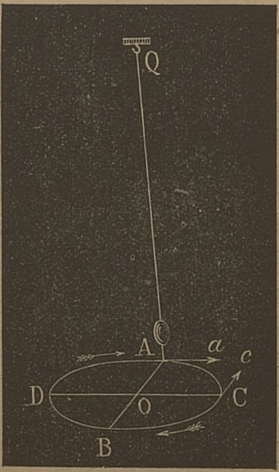


Fig. 378. Wahadło, drgające kołowo.

Zobaczmy obecnie, w jaki sposób można wiadomości te zastosować do drgającego ruchu eteru. Warunki, analogiczne do wyżej opisanych, możemy otrzymać, umieszczając pomiędzy dwoma nicol'ami bardzo cienką tafelkę miki, której przecięcie główne *R S* (fig. 376, str. 604) stanowi z płaszczyzną drgań *M N* polaryzatora kąt równy 45°. Promień, wychodzący z tego ostatniego, rozkłada się w tafelce, jak wiemy, na promień, drgający w płaszczyznie jej głównego przecięcia *R S*, oraz na promień drgający w płaszczyznie prostopadłej do tamtej *U V*. Pod wpływem dwóch tych impulsów, cząstka np. *O* eteru, znajdująca się na powierzchni tafelki, poczyna wykonywać (na podobieństwo owego wahadła) drgania kołowe lub prostolinijne, zależnie od różnicy faz w oscylacyach dwóch wychodzących z tafelki promieni. Przypuśćmy, że różnica ta wynosi ćwierć fali dla pewnej jednorodnej barwy, to według powyższego, będziemy musieli przyjąć, że cząstka eteru *O* opisuje koła w płaszczyznie, prostopadłej do kierunku rozchodzenia się promienia, przyczem czas, użyty na odbycie jednej takiej kołowej oscylacyi, jest równy peryodowi drgania dla odnośnej jednorodnej barwy. Oscylacye te udzielają się następnym cząstkom, a ponieważ każda z nich rozpoczyna swój ruch nieco później, niż jej poprzedniczka, tworzy się przeto spiralna falowa linia, której jeden całkowity skręt odpowiada jednej oscylacyi. Taki promień świetlny zowie się *kołowo spolaryzowanym*, w odróżnieniu od promienia *prostolinijnie spolaryzowanego*, którym zajmowaliśmy się w poprzednich paragrafach i w którym każda cząstka eteru drga tylko w kierunku jednej prostej linii, prostopadłej do samego promienia. Należy tutaj jeszcze dodać, że drgania kołowo spolaryzowanego promienia odbywają się z lewa na prawo, lub też przeciwnie z prawa na lewo, zależnie od tego, który z dwóch promieni, wychodzących z tafelki, wyprzedza swego towarzysza. Promień kołowo spolaryzowany, badany za pomocą nicol'a, zachowuje się pozornie, jak promień naturalny, którego drgania mogą odbywać się we wszelkich możliwych kierunkach, byle tylko prostopadłych do jego drogi. W istocie, jeżeli drgania są kołowe, to wszystkie strony promienia są jednakowe, jak w promieniu natural-

nym; dlatego też gdy wspomnianą tafelkę z miki, powodującą kołową polaryzacyę, umieścimy w przyrządzie polaryzacyjnym, zobaczymy, że na ekranie stale panuje jasność, niezależnie od położenia analizatora względem polaryzatora. Lecz gdy po nałożeniu na pierwszą tafelkę drugiej, tej samej grubości tak, ażeby ich przecięcia główne były skrzyżowane, będziemy obracali analizator, to przekonamy się, że gdy ten skrzyżuje się z polaryzatorem, światło na ekranie zgaśnie całkowicie. Promień tedy, wychodzący z tafelek, zachowuje się jak prostolinijnie spolaryzowany. W samej rzeczy jest on takim. Jeżeli bowiem przyjmiemy, że po wyjściu z pierwszej tafelki promień *U V*, prostopadły do jej głównego przecięcia, wyprzedza o ćwierć fali promień *R S*, biegnący w kierunku tegoż przecięcia, to po wyjściu z drugiej tafelki, skrzyżowanej z tamtą, promienie oczywiście zamieniają swe role: ten, który biegł poprzednio wzdłuż przecięcia głównego, biegnie teraz w kierunku doń prostopadłym i naodwrót, wskutek czego różnica faz ich oscylacyi znosi się i redukuje do zera. Z drugiej więc tafelki wychodzą dwa ruchy drgające wzajemnie prostopadle i bez różnicy faz, tworzą też razem, według tego cośmy wyżej powiedzieli, jeden ruch prostolinijny, dając początek promieniowi prostolinijnie spolaryzowanemu. Opisane doświadczenie pokazuje, w jaki sposób można poznać światło kołowo spolaryzowane i zarazem, jak je odróżnić od naturalnego. Zauważymy jeszcze, że światło kołowo spolaryzowane na prawo lub na lewo, badane w powyższy sposób, zachowuje się jednakowo. Można wszelako dwa te rodzaje światła rozróżnić, wstawiając pomiędzy tafelkę miki i analizator tafelkę gipsową, wtedy bowiem pojawiające się na ekranie barwy są rozmaite, zależnie od tego, czy światło spolaryzowane jest na prawo, czy na lewo. Barwy w pierwszym wypadku są dopełniającemi do barw w drugim.

Powróćmy jeszcze raz do naszego wahadła i zobaczmy, jakie są jego drgania w razie, gdy znajduje się pod jednoczesnym wpływem dwóch impulsów, nadających mu wprost przeciwne kołowe ruchy. Przypuśćmy, że w chwili, gdy wahadło zajmuje położenie *A* (fig. 379, str. 616), zostaje jednocześnie uderzone

w kierunkach $A\ a$ i $A\ a'$ z jednakową siłą. Ponieważ przedtem posiadało ono już ruch wzdłuż $A\ B$, to pod wpływem pierwszego z tych uderzeń opisywałoby koło z lewa na prawo, pod wpływem zaś drugiego—koło z prawa na lewo. Lecz gdy dwa te uderzenia działają jednocześnie, wtedy znoszą się wzajemnie, a wahadło drga dalej wzdłuż prostej $A\ B$. Jeżeliby drugie uderzenie nastąpiło wtedy, gdy wahadło pod wpływem pierwszego opisało już część $A\ r$ koła na prawo, drgania jego również przeszłyby w prostolinijne, lecz w kierunku $r\ r'$. Uogólniając wszystkie te wyniki, powiemy, że gdy na drgające ciało działają dwa impulsy, usiłujące mu nadać kołowe ruchy w dwie przeciwne strony, wtedy drga ono prostolinijnie, przyczem płaszczyzna tych drgań zbacza lub nie od pierwotnej płaszczyzny, zależnie od tego, czy dwa te uderzenia następują jednocześnie, czy też jedno opóźnia się względem drugiego.

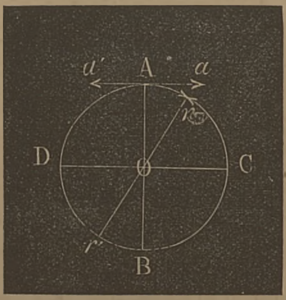


Fig. 379. Współdziałanie dwóch przeciwnych kołowych oscylacyj.

Stosując to do drgań świetlnych, należy przyjąć, że dwa biegnące razem promienie, spolaryzowane kołowo, lecz w przeciwne strony i mające jednakowe natężenie oraz częstość drgań, wytwarzają razem promień spolaryzowany prostolinijnie. Naodwrót każdy promień prostolinijnie spolaryzowany można rozpatrywać jako złożony z dwóch o jednakowem natężeniu i spolaryzowanych kołowo w przeciwne strony.

Jeżeli w jakimkolwiek środku dwa takie promienie złączone w jeden biegną z jednakową prędkością, natenczas nie powstaje żadna różnica faz ich oscylacyi i mamy prostolinijnie drgający ruch o pierwotnym kierunku. Odpowiada to wypadkowi, w którym wahadło otrzymuje owe dwa przeciwne uderzenia w chwili, gdy znajduje się w punkcie A lub B swej oscylacyi wzdłuż prostej $A\ B$ (fig. 379). Gdyby zaś istniały substancye, w których promień spolaryzowany np. na prawo rozchodziłby się prędzej, niż spolaryzowany na lewo, musiałaby powstać różnica faz ich oscylacyi; jeżeliby takowa wynosiła niecałkowitą albo nieparzy-

stą liczbę pół-fali, wtedy z dwóch kołowych drgań powstałoby znów drganie prostolinijne, lecz już nie w pierwotnym kierunku, ale na prawo lub lewo od niego. Odpowiadałoby to wypadkowi, w którym wahadło, otrzymawszy drugie uderzenie w chwili, gdy pod wpływem pierwszego przebyło już np. część koła *A r* (fig. 379, str. 616), drga wzdłuż prostej *r r'*, pochylonej względem pierwotnego kierunku drgań *A B*. Zboczenie płaszczyzny drgań promienia prostolinijnie spolaryzowanego, który przeszedł przez taką substancyę, powinno być tem większe, im grubszą warstwę ona przedstawia, albowiem wtedy jeden ze składowych, kołowo spolaryzowanych promieni bardziej opóźnia się względem drugiego. Otóż Fresnel dowiódł, że w istocie kwarc stanowi taką substancyę. Skombinował on mianowicie kilka pryzmatów z różnych odmian tego minerału, które naprzemian skręcają płaszczy-

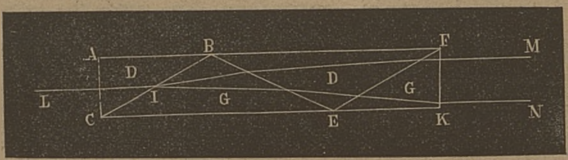


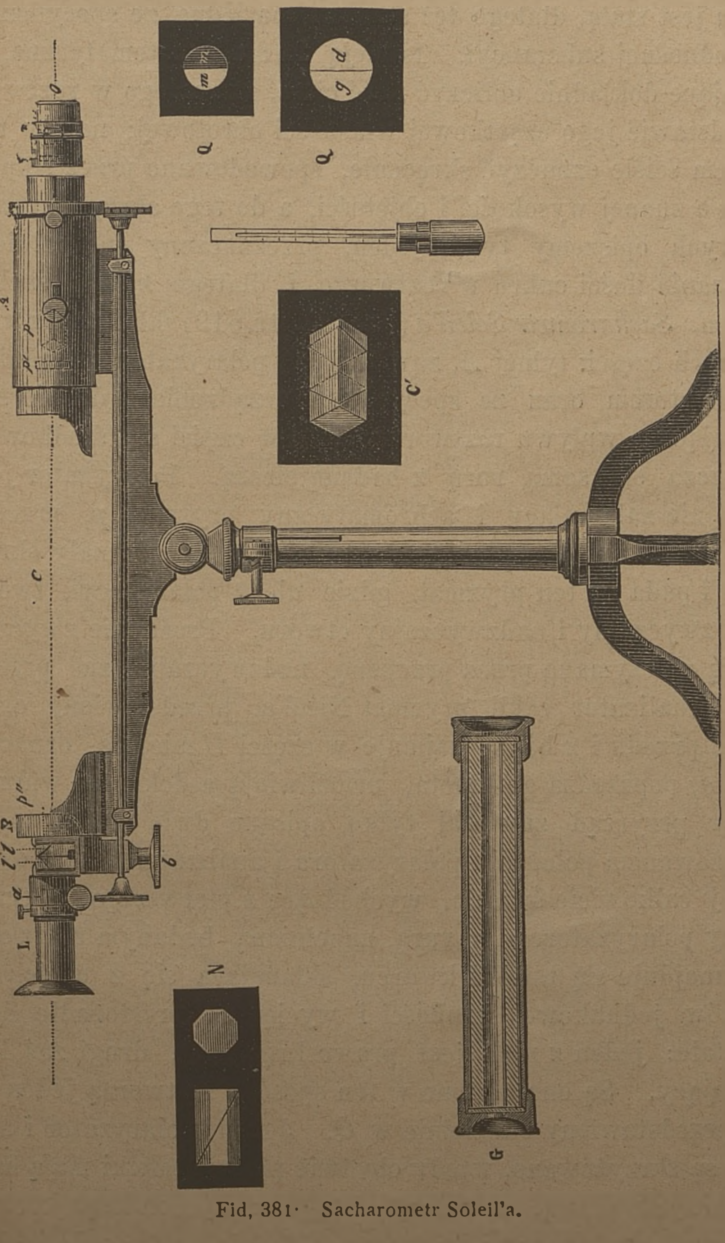
Fig. 380. Złożony pryzmat kwarcowy.

znę polaryzacyi na prawo albo na lewo i otrzymał jeden prostokątny pryzmat *A C F K* (fig. 380), o płaszczyznach *A C* i *F K*, prostopadłych do osi optycznej. Promień *L I*, spolaryzowany prostolinijnie, pada na pierwszą z nich i biegnie wzdłuż osi. Wychodząc z założenia, że w tym kierunku dwa kołowo, lecz w przeciwne strony spolaryzowane promienie rozchodzą się z niejednakową prędkością, należy przypuścić, że i promień *L I* rozszczepia się w pierwszym pryzmacie *A B C* na dwa takie promienie: jeden spolaryzowany na prawo, drugi na lewo. Ponieważ pryzmat *A B C* jest prawoskręcający, pierwszy promień rozchodzi się w nim prędzej niż drugi, przyszedłszy jednak do drugiego pryzmatu *C B E*—lewoskręcającego—biegnie wolniej i od tej chwili zbliża się do normalnej, podczas gdy promień, spolaryzowany na lewo, od niej się oddala na zasadzie praw załamania. Promienie te odłączają się jeden od drugiego, a że w każdym na-

stępnym pryzmacie powtarza się to samo, to wreszcie przez płaszczyznę *F K* wychodzą dwie oddzielne wiązki światła. Badane za pomocą nicol'a, okazują się one obydwie jako kołowo spolaryzowane; przepuszczone zaś jeszcze oprócz tego przez tafelkę gipsową, nachyloną pod kątem 45^0, tworzą na stojącym przed przyrządem polaryzacyjnym ekranie dwie jasne plamy, których barwy są wzajemnie dopełniające. Pojawienie się tych dopełniających barw dowodzi w danym wypadku, że jedna z wiązek, wychodzących z pryzmatu kwarcowego, jest kołowo spolaryzowana na prawo, druga zaś na lewo. Doświadczenie potwierdza tedy w zupełności znakomite przypuszczenie Fresnel'a, że prostolinijnie spolaryzowany promień rozszczepia się w kwarcu na dwa kołowo i przeciwnie spolaryzowane promienie, biegnące z niejednakową prędkością.

Znaczna ilość substancyj ciekłych, albo rozpuszczonych w jakiejś cieczy obojętnej, wywiera na światło spolaryzowane wpływ podobny do działania kwarcu. Ponieważ własność skręcania płaszczyzny polaryzacyi objawia się w danych wypadkach niezależnie od wszelkich przejawów krystalizacyi, możemy więc przypuścić, że własność ta nie zależy od pewnego określonego układu cząstek, lecz od budowy samych cząstek. Napotykamy ją zwykle u ciał, przedstawiających pewien stopień komplikacyi cząsteczkowej, że wymienimy tylko rozmaite gatunki cukru, dekstrynę, gumę arabską, olejek cytrynowy i terpentynowy, kwas winny, chininę, strychninę i t. d. Niektóre z wymienionych ciał skręcają płaszczyznę polaryzacyi na prawo, jak np. cukier trzcinowy, gronowy, mleczny, dekstryna, olejek cytrynowy; zaś inne—jak białko, żelatyna, guma arabska, olejek terpentynowy, skręcają ją na lewo. Istnieją także pewne związki, które pomimo jednakowego składu chemicznego, są w pewnych razach prawoskręcające, w innych—lewoskręcające, jak np. kwas winny. Ponieważ, jak powiedzieliśmy, własność obrotowa cieczy zależy od jej cząstek, to oczywiście, wielkość skręcenia płaszczyzny polaryzacyi, spowodowanego przez słup tejże cieczy, jest *proporcyonalna do liczby cząstek, przez jakie przeszło światło, czyli do wysokości oraz gęstości tegoż słupa.* Dzieląc tę wielkość

przez wysokość i gęstość, otrzymujemy skręcenie, jakie spowodo-



Fid, 381· Sacharometr Soleil'a.

wałaby pojedyńcza cząstka, które nazywamy własnością obro-

tową cząstkową. Jest ona różna dla rozmaitych ciał, lecz dla jednego i tego samego ciała nie zmienia się, jeżeli tylko temperatura jest stałą, dlatego też stanowi ona jednę ze specyficznych cech odnośnej substancyi. Istnieją formuły matematyczne, pozwalające dokładnie obliczyć ilość ciała, zawartego w roztworze, na podstawie jego cząstkowej własności obrotowej; należy tylko przytem ściśle oznaczyć skręcenie, spowodowane przez słup roztworu o znanej wysokości i objętości, a do tego służą przyrządy, z których opiszemy tylko jeden, przeznaczony specyalnie do oznaczania ilości cukru w roztworze i dlatego zwany sacharometrem. *Sacharometr Soleil'a* (fig. 381, str. 619) składa się z trzech głównych części: tylnej *A*, zawierającej polaryzator, przedniej *B* z analizatorem oraz ze specyalnem urządzeniem do mierzenia skręcającego wpływu roztworu cukru; w części zaś środkowej *C* umieszcza się samą rurę z badaną cieczą. Polaryzator jestto podwójnie załamujący i achromatyczny pryzmat *p*, przedstawiony osobno w *C′*. Światło przenika w *o* przez mały okrągły otwór i pada na ten pryzmat, gdzie ulega polaryzacyi, tworząc obraz zwyczajny i nadzwyczajny otworu. Promienie zwyczajne zostają zatrzymane przez przeponę, nadzwyczajne zaś przechodzą. Analizator czyli pryzmat Nicol'a, przedstawiony osobno w *Ṅ* z przodu i z boku, zajmuje w części *B* miejsce, oznaczone literą *a*; poprzedza go luneta, umożliwiająca dokładne widzenie. Gdyby przyrząd zawierał tylko opisane dwie części, to przy skrzyżowanem położeniu polaryzatora i analizatora, ten ostatni gasiłby całkowicie światło, wychodzące z pierwszego. Lecz pomiędzy polaryzatorem a rurą, napełnioną badanym roztworem, w *p′* znajduje się tafelka kwarcu, składająca się z dwóch półkrążków jednakowej grubości i wyciętych prostopadle do osi kryształu: jeden z nich jest prawoskręcający, drugi zaś lewoskręcający. Są one złożone w ten sposób, że tworzą jeden krążek, przedstawiony oddzielnie w *Q*. Jeżeli polaryzator i analizator są skrzyżowane, wtedy obydwie połowy tafelki mają barwę zupełnie jednakową, co zależy od tego, że jeden krążek skręca płaszczyznę polaryzacyi na prawo dokładnie o tyle, o ile ją drugi krążek skręca na lewo. Przy obracaniu zaś analizatora w jednę

lub drugą stronę, jedna połowa tafelki (grubość jej równa 3,7 milim.) przyjmuje barwę niebieską, druga zaś (*Q'*) czerwoną, co znów pochodzi ztąd, że płaszczyzny drgań promieni świetlnych, które przeszły przez obadwa pół-krążki, nie są już symetrycznie położone względem głównego przecięcia analizatora, wskutek bowiem obrotu tego ostatniego, przecięcie to zbliżyło się do płaszczyzny drgań jednego promienia, oddaliło się zaś od płaszczyzny drgań drugiego. Umieściwszy między tafelką i analizatorem jakąś ciecz, skręcającą płaszczyznę polaryzacyi, wywołujemy ten sam rezultat, co przez obracanie analizatora, albowiem ciecz ta powiększa działanie jednego z pół-krążków tafelki (prawego lub lewego) w tym samym stosunku, w jakim ono zmniejsza się w drugim pół-krążku. Rura *G*, napełniona badanym roztworem i umieszczona w *C*, znosi jednakowość barw obu połów tafelki kwarcowej. Skręcenie, spowodowane przez słup cieczy, określa się za pomocą odpowiedniej grubości kryształu kwarcu o działaniu równem, lecz przeciwnem jej działaniu. W tym celu do przyrządu dodany jest t. zw. kompensator, który pozwala jednocześnie zmieniać grubość tego kwarcu oraz kierunek powodowanego przezeń skręcenia. Kompensator stanowi jednem słowem środek do zneutralizowania skręcenia, wywołanego przez badaną ciecz, a więc do przywrócenia jednakowości barw obu połów tafelki dwukwarcowej *Q*. Znając grubość tego kwarcu neutralizującego (którą łatwo zmierzyć za pomocą podzielonej linijki), można obliczyć kąt, na jaki została skręcona płaszczyzna polaryzacyi wskutek wstawienia rury z badanym roztworem; gdy oprócz tego jeszcze znamy zkądinąd cząstkową zdolność obrotową substancyi rozpuszczonej, mamy już wszystkie dane do obliczenia — na zasadzie wspomnianych wyżej formuł matematycznych — ilość tej substancyi, zawartej w roztworze ([1]).

([1]) Wundt, Physique.

ROZDZIAŁ XI.

Oko ludzkie.

§ 1. Budowa oka. Tworzenie się obrazu. Oko daleko- i krótkowidzące.

Przy wszystkich licznych i różnorodnych procesach, jakie dotychczas opisaliśmy, zwracaliśmy uwagę na sposób rozprzestrzeniania się światła w rozmaitych środkach, na modyfikacye, jakim ono pod wpływem zmiany warunków ulegało i które dotyczyły już to jego barwy, natężenia, częstości drgań, już to płaszczyzny tych ostatnich. Nie zajmowaliśmy się wszakże pytaniem, jak światło działa na nasze zmysły i jaką drogę przebyć musi, ażeby, że tak powiemy, przejść ze świata zewnętrznego do naszej świadomości.

Otóż badając tę drogę, przekonywamy się, że promień świetlny, doszedłszy do naszego oka, ulega tutaj załamaniu w kilku przezroczystych ciałach, a następnie dochodzi do pewnych rozgałęzień nerwowych, które z kolei doprowadzają odnośne wrażenie do mózgu. Drogę tę przez różne załamujące środki oka promień przebywa ściśle na zasadzie znanych nam praw zwykłego załamania, samo zaś oko nie przedstawia nic innego, jak małą ciemnię optyczną, o przedniej ściance, zaopatrzonej w przezroczyste okienko, po za którem znajduje się soczewka, rzucająca obrazy otaczających nas przedmiotów na ekran. Przyjrzyjmy się tedy nieco bliżej urządzeniu tej ciemni optycznej.

Oko leży w jamie kostnej, zwanej *oczodołem* (fig. 382, str. 623); pod względem kształtu mało różni się od kuli, a zewnętrzną jego powłokę stanowi nader mocna błona, w której rozróżniamy dwie części: przednią mniejszą *A*, przezroczystą czyli *rogówkę* i większą tylną *H* białą, nieprzezroczystą—*twardówkę*. Krzywizna przezroczystej rogówki jest większa, aniżeli krzywizna twardówki tak, że pierwsza z nich przedstawia się jakby osadzone w gałce ocznej szkiełko zegarkowe. Pod zewnętrzną

błoną leży druga, tak zwana *naczyniówka I*, która w przedniej części oka, tuż pod rogówką przechodzi w *tęczówkę*, kolistą błonę *D*, określającą barwę oka; ta ostatnia u różnych osobników bywa szarą, albo jasno lub ciemno-niebieską, zielonawą, żółtawą lub brunatną. Tęczówka stanowi rodzaj przepony dla światła, przechodzącego tylko przez okrągły otwór, znajdujący się w jej środku i zwany *źrenicą* (*C*). Jest ona właśnie okienkiem, przez które światło przenika do wnętrza oka. Za tęczówką leży *so-*

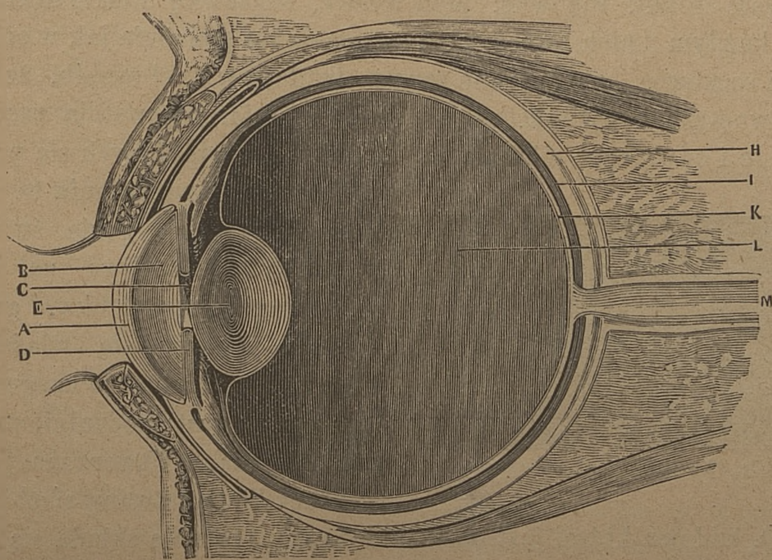


Fig. 382. Przecięcie oka ludzkiego.

czewka E, utworzona z licznych włókien i mająca, jak widzimy, kształt dwuwypukłej soczewki, której przednia powierzchnia posiada nieco mniejszą krzywiznę, to znaczy, że jest mniej wypukłą, niż powierzchnia tylna. Soczewka dzieli jamistość oka na dwie części: przednią—mniejszą i tylną—większą. Pierwsza (*B*), ograniczona przez rogówkę i soczewkę, wypełniona jest cieczą, przedstawiającą pod względem fizycznych własności prawie czystą wodę i dlatego zwaną *płynem wodnym;* część po za soczewką

wypełniona jest galaretowatą masą, tworzącą *ciało szkliste L*. Dodajmy jeszcze, że na wewnętrznej powierzchni naczyniówki znajduje się czarny barwnik, odgrywający prawdopodobnie ważną rolę w procesie widzenia, według jednych bowiem pochłania on promienie najbardziej drażniące; według innych zaś przeszkadza odbijaniu się na wszystkie strony promieni świetlnych, ułatwiając w ten sposób jasność widzenia.

Jeżeli tedy promień świetlny przenika do oka, to zanim dosięga tylnej jego ściany, musi przejść przez następujące przezroczyste środki: rogówkę, płyn wodny, soczewkę i ciało szkliste. W każdym z nich promień ulega załamaniu podobnie jak w szklanej soczewce, a wszystkie razem działają w taki sposób, że na wewnętrznej powierzchni wspomnianej ściany powstają rzeczywiste i odwrócone obrazy przedmiotów, znajdujących się przed okiem. Powierzchnia ta stanowi miejsce, gdzie światło napotyka wrażliwe na jego działanie części oka, gdzie więc poczyna się właściwy proces widzenia, do czego budowa jej jest specyalnie przystosowaną. Utworzona jest przez błonę, zwaną *siatkówką* (*K*), budowa której jest bardzo złożona. Głównie składa się ona z rozgałęzień nerwu wzrokowego (*M*), zakończonych specyalnemi ciałkami czuciowemi; na odnośnej figurze widzimy, jak nerw ten wchodzi od tyłu do gałki ocznej przez znajdujący się tamże otwór i rozgałęzia się w siatkówce, stykającej się z ciałem szklistem.

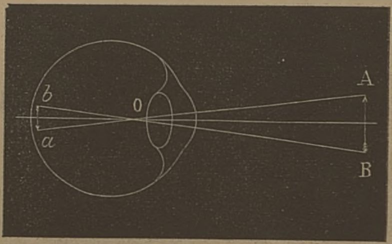


Fig. 383. Tworzenie się obrazu w oku.

Niechaj przed okiem *O* znajduje się przedmiot *AB* (fig. 383), ze wszystkich punktów którego wychodzą promienie, a część ich wpada do oka. Ponieważ zdolność załamująca dla wszystkich stałych i ciekłych środków tego ostatniego jest większa, aniżeli dla powietrza, to przypuszczamy, że promienie, wychodzące np. z punktu *A*, zbierają się w *a*, wychodzące zaś z *B* w *b*, wskutek czego na siatkówce tworzy się rzeczywisty i odwrócony obraz *ab*

przedmiotu *A B*. Doświadczenie potwierdza ten wniosek, albowiem w oczyszczonem oku świeżo zabitego zwierzęcia, zwróconem źrenicą do światła, można widzieć odwrócone i zmniejszone obrazy otaczających przedmiotów. Ze sposobu tworzenia się tych obrazów wnioskujemy dalej, że wewnątrz oka znajduje się punkt, przez który promienie świetlne przechodzą bez załamania; stanowi on *środek optyczny O* oka, prosta zaś linia, przeprowadzona przez punkt *O* i środek soczewki, zowie się *główną osią optyczną oka.*

Przedmiot, którego obraz pada na siatkówkę, wydaje się tem jaśniejszym, im więcej światła od niego przenika do wnętrza oka. Gdy spoglądamy tedy na przedmiot słabo oświecony, źrenica się rozszerza, a to w celu wpuszczenia do oka jak największej ilości promieni; przeciwnie gdy patrzymy na przedmiot silnie świecący, zwęża się ona i tym sposobem zatrzymuje nadmierną ilość światła, jakaby do siatkówki dotrzeć mogła. Dokładne rozróżnienie widzianego przedmiotu zależy od przestrzeni, jaką obraz jego zajmuje na siatkówce: im ona jest większa, czyli im większy jest kąt *a O b*, utworzony przez dwie boczne osie, idące od skrajnych punktów obrazu, tem widzenie jest wyraźniejsze. Kąt *a O b* jest równy, jak wiadomo z geometryi, kątowi *A O B*, utworzonemu przez dwie linie proste, poprowadzone od wierzchołka i podstawy przedmiotu do optycznego środka oka. Ten właśnie kąt zowie się *kątem widzenia.* Oczywiście jest on tem większy, im bliżej dany przedmiot znajduje się od oka; ponieważ obrazy pojedyńczych punktów wypadają wtedy na siatkówce dalej jeden od drugiego, to możemy je dokładniej odróżnić. W taki sposób tłómaczy się, dlaczego w blizkich przedmiotach możemy odróżnić więcej szczegółów, aniżeli w dalekich.

Ponieważ oko możemy porównać do układu soczewek, to dziwnem na pozór nam się wydaje, że widzi ono wyraźnie przedmioty, znajdujące się od niego na bardzo rozmaitej odległości. Układ ten w oku posiada chyba własność zmieniania swej krzywizny, stosownie do tej odległości, dzięki czemu, promienie zbierają się na siatkówce, rozumiemy bowiem, że gdyby one zbierały się po za nią albo przed nią, obraz każdego punktu nie byłby

punktem, lecz krążkiem i widzenie byłoby bardzo niejasne. W istocie tak jest, oko bowiem posiada własność tak zw. *akomodacyi* czyli przystosowywania się, polegającej na tem, że soczewka może powiększać swą wypukłość, a to dzięki działaniu pewnych mięśniowych elementów, otaczających ją dokoła. Jej zdolność załamująca wzrasta w miarę skurczu tego mięśnia. Przy zbliżaniu przedmiotu, a więc gdy obraz jego oddalałby się po za siatkówkę, soczewka staje się bardziej wypukłą, promienie silniej załamane zbierają się bliżej i obraz zostaje znów sprowadzony na właściwą warstwę. Zdolność akomodacyi posiada jednak swoję granicę, po za którą soczewka wypuklać się już nie może; dlatego też istnieje pewne minimum odległości, przy której widzenie jest jeszcze wyraźne i ono to właśnie określa t. zw. *odległość dokładnego widzenia.* Jest ona różna u rozmaitych osobników, często także bywa różną dla lewego i prawego oka u jednego i tego samego osobnika. Dla normalnego oka wynosi ona 25—30 centymetrów, w ogóle zaś zależy jedynie od zdolności akomodacyjnej oka i jest tem mniejsza, im podatniejszą jest soczewka, oraz im mocniejszym jest wspomniany mięsień.

Wymiary układu załamującego w oku normalnem (emmetropia) są takie, że gdy mięsień akomodacyjny jest w spoczynku, obrazy odleglych przedmiotów tworzą się na siatkówce, dla blizkich zaś wypadają na niej wyraźnie tylko przy pewnym wysiłku akomodacyjnym. Teoretycznie najbardziej oddalony punkt, wyraźnie jeszcze widziany przez oko normalne, leży w nieskończoności, w rzeczywistości wszakże odległość ta, ograniczona przez konieczność wytworzenia na siatkówce obrazu niezbyt małego i niezbyt słabego, zależy także od wielkości i blasku samych przedmiotów.

Z wiekiem soczewka oka staje się mniej podatną, mięsień zaś akomodacyjny słabszym, wskutek czego jej zdolność przystosowawcza maleje, a odległość dokładnego widzenia wzrasta (presbyopia). Odbywa się to stopniowo tak, że w wieku lat 40 do 45 wada ta, dla oka przedtem normalnego, jest prawie powszechną. Osoby dotknięte nią noszą okulary o szkłach wypukłych, które czynią promienie bardziej załamanemi tak, że zbierają się

bliżej, wskutek czego nie potrzeba przedmiotów trzymanych np. w ręku odsuwać tak daleko przed siebie. Sposób ten przedstawia wszakże tę niedogodność, że obrazy odległych przedmiotów tworzą się za blizko i dlatego oko, uzbrojone w okulary wypukłe, nie mogąc przez nie dokładnie widzieć takich przedmiotów, musi na te ostatnie spoglądać bez szkieł.

Opisana wada oka stanowi, jak widzieliśmy, anomalię akomodacyjną; oprócz niej zaś istnieją jeszcze inne, zależne od anatomicznej budowy samej gałki ocznej. Gdy ta ostatnia jest wy-

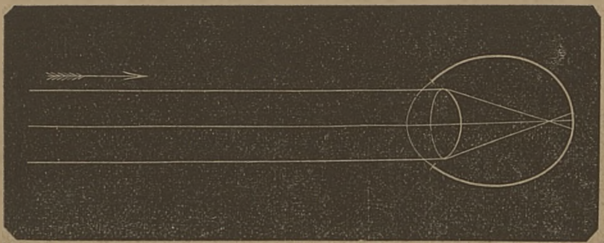


Fig. 384. Oko krótkowidza.

dłużana w kierunku osi optycznej (fig. 384), wtedy ognisko dla promieni od przedmiotu nieskończenie odległego nie wypada na

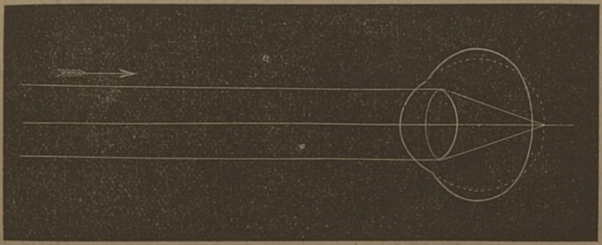


Fig. 385. Oko dalekowidza.

siatkówce, lecz bliżej, innemi słowy teoretyczna maxymalna odległość dokładnego widzenia nie jest nieskończenie wielką, minimalna zaś jest mniejsza, niż dla oka normalnego w tym samym wieku (myopia). Ponieważ w oku wydłużonem obraz tworzy się za blizko, to osoby niem obdarzone, przybliżają przedmiot, przez co jednocześnie przysuwają obraz do siatkówki; są to więc tak zwani *krótkowidze*. Noszą oni okulary wklęsłe, które zmniejszają zbieżność promieni świetlnych, wpadających do oka i sku-

piają je na samej siatkówce. Inna wada oka, wprost przeciwna tylko co opisanej, polega na tem, że gałka oczna jest za krótka (hypermetropia), wskutek czego ognisko dla promieni od przedmiotu nieskończenie odległego wypada po za siatkówką (fig. 385, str. 627). Wynika z tego niezdolność przystosowawcza do małych odległości, widzenie zaś przedmiotów oddalonych pozostaje zupełnie wyraźnem; osoby dotknięte tą wadą zowią się *dalekowidzami*. Noszą oni okulary wypukłe, które czynią promienie, wychodzące z bliższych przedmiotów, bardziej zbieżnemi, skupiając je na siatkówce. Dodajmy jeszcze, że okulary, na których zwykle podaną jest w calach wielkość promienia krzywizny ich powierzchni, stanowią odcinki kuli, czyli że są sferyczne. Od pewnego wszakże czasu zaczęto używać także i szkieł cylindrowych, a to w wypadkach wady ocznej, zwanej *astygmatyzmem*. Polega ona na tem, że powierzchnie załamujące oka nie są symetryczne wokoło jego głównej osi, wskutek czego odległość ogniskowa układu załamującego nie jest jednakowa we wszystkich płaszczyznach. Istnieją oczy, gdzie różnice krzywizny w różnych przecięciach są tak znaczne, że powodują silne zboczenia w biegu promieni świetlnych, przenikających do oka. Przypuśćmy np. że podzieliliśmy rogówkę na dwie polowy, najprzód przez poprowadzenie płaszczyzny pionowej, a następnie poziomej. Otóż w oku normalnem powierzchnie obu tych przecięć mają krzywiznę jednakową, gdy przeciwnie w oku astygmatycznem promień jednej jest mniejszy niż promień drugiej, a jeżeli różnica ta jest dostatecznie wielka, oko może być krótkowidzące w pierwszym kierunku, wcale zaś takiem nie jest, albo nawet jest dalekowidzącem w drugim. Rzecz oczywista, że chcąc naprawić ten błąd w organie wzroku, należy promienie świetlne przepuścić przez szklo, przywracające równowagę obu przecięć; promienie, uległszy działaniu takiego szkła, oraz działaniu rogówki nienormalnej, przybierają kierunek ten sam, co po przebyciu jedynie rogówki normalnej. Jak wspomnieliśmy wyżej, używa się do tego soczewek cylindrycznych, którym nadaje się takie położenie, że zbieżność promieni, spowodowana przez nie w pewnym kierunku, ma miejsce w płaszczyźnie tego

samego przecięcia, w którem powierzchnia rogówki jest mniej wypukłą. Ciekawym jest fakt, dowiedziony niedawno, że szczególniej u młodych osób soczewka oka może uledz przekształceniu, stanowiącemu kompensatę astygmatyzmu rogówki.

§ 2. Widzenie dwojgiem oczu. Stereoskop. Odczuwanie barw.

Widzieliśmy w poprzednim §, że główną oś optyczną oka stanowi linia prosta, przechodząca przez jego środek optyczny oraz środek soczewki; w oku dobrze zbudowanem przechodzi ona także przez środek źrenicy. W kierunku tej osi oko najdokładniej widzi przedmioty. *Kątem optycznym* zowie się kąt $B\ A\ C$

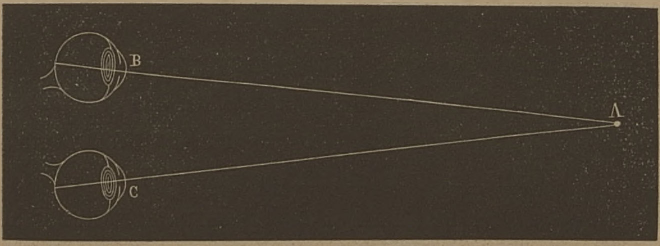


Fig. 386. Kąt optyczny.

(fig. 386), utworzony przez główne osie optyczne oka prawego i lewego, skierowanych na jeden i ten sam punkt; oczywiście jest on tem mniejszy, im bardziej odlegly jest przedmiot, na który patrzymy. Ocenianie odległości zależy od wielu warunków, oprócz bowiem kąta optycznego, wpływa na to jeszcze, jak wiemy, kąt widzenia, a także porównanie z wielkością znanych nam dobrze przedmiotów, oraz zmniejszanie się lub wzmaganie jasności obrazu na siatkówce. Gdy spoglądamy np. w głąb' alei, wysadzanej drzewami, zdaje nam się, że te ostatnie są coraz mniejsze, albowiem kąt widzenia dla nich maleje w miarę odległości; przyzwyczajenie jednak nauczyło nas, iż tak nie jest i ono też modyfikuje nasz sąd w danych wypadkach. Ponieważ kąt optyczny powiększa się lub zmniejsza w miarę zbliżania albo od-

dalania się przedmiotu, przyczem oczy wykonywają odpowiednie ruchy w celu skierowania nań obu osi, to i ruchy te mogą nam dać pojęcie o odległości. Wymaga to jednak długiej wprawy, jak tego dowodzą ślepi od urodzenia, którym, dzięki operacyi, przywrócono wzrok i którzy sądzą z początku, że wszystkie przedmioty znajdują się na jednakowej odległości.

Gdy patrzymy dwojgiem oczu na jeden przedmiot, na każdej z siatkówek tworzy się obraz,—pomimo to jednak widzimy tylko przedmiot pojedyńczy. Ażeby to wytłómaczyć, Gassendi przyjmował, że w danej chwili mamy świadomość jednego albo drugiego obrazu, doświadczenia jednak obaliły to przypuszczenie. Taylor i Wollaston wypowiedzieli niegdyś pogląd, że odpowiadające sobie czyli homologiczne miejsca na siatkówkach prawego i lewego oka należą do jednego i tego samego rozgałęzienia nerwowego, które po wyjściu z mózgu rozdwaja się na odnogę prawą i lewą. Wreszcie Brewster słusznie przyjmuje, że jedność wrażenia, pomimo powstawania dwóch obrazów, zależy od tego, że przyzwyczailiśmy się odnosić jednoczesne wrażenia na dwóch siatkówkach do jednego przedmiotu ([1]).

Wiadomo dobrze, że patrząc dwojgiem oczu na otaczające przedmioty, nie widzimy ich w jednej płaszczyźnie, lecz wyraźnie jesteśmy świadomi tego, iż są bryłowate i rozmaicie od nas oddalone: innemi słowy, widzenie dwojgiem oczu daje nam pojęcie o trzech wymiarach przestrzeni. Dlaczego jednak malowidła nie mogą wywołać tego samego wrażenia, bez względu na mistrzowstwo artysty, który je stworzył? Długi czas nie wiedziano dokładnie, na czem polega ta różnica, dająca się tak wyraźnie zauważyć przy patrzeniu na malowidło oraz na sam przedmiot, przezeń przedstawiony. Chcąc bliżej wniknąć w naturę tej różnicy, wyobraźmy sobie sześcian lub czworokątną piramidę (fig. 387, str. 631), umieszczoną na stole, blizko przed naszemi oczami, pośrodku pomiędzy niemi. Gdy będziemy patrzyli na jeden lub drugą dwojgiem oczu, przedstawią nam się one tak, jak w *A* i *B*. Gdy zaś zamkniemy lewe oko, widok zmieni się

([1]) Ganot, Traité de Physique.

w sposób, pokazany w *A'* i *B'*: płaszczyzny z prawej strony wydadzą się daleko większe niż przedtem, leżące z lewej mniejsze, albo też znikną zupełnie; wreszcie po zamknięciu oka prawego, widok będzie przeciwny ostatniemu, to jest przedstawi się jak w *A''* i *B''*. To samo możemy zaobserwować na innych przedmiotach, przyczem przekonamy się zawsze, że prawem okiem dostrzegamy części, zakryte dla lewego i naodwrót. Wynika z tego, że obrazy przedmiotu, które powstają na siatkówkach obu oczu, nie są identyczne; dzięki przyzwyczajeniu od najmłodszych lat, zlewają się one w naszej świadomości w jedną całość

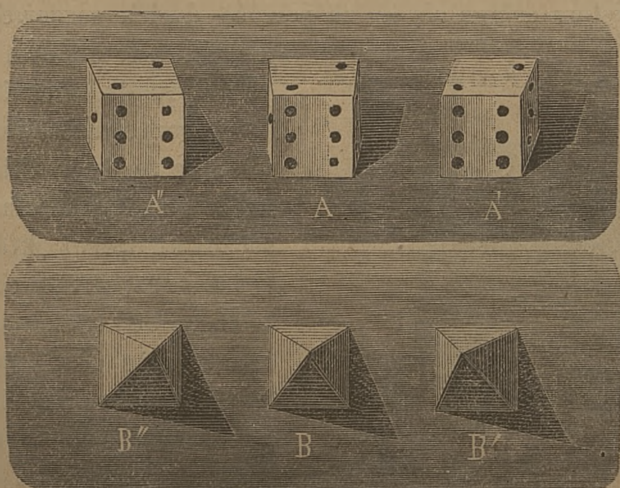


Fig. 387. Różnice przy patrzeniu jednem lub dwojgiem oczu.

plastycznie bryłowatą. Przeciwnie, obrazy malowidła, tworzące się w obu oczach, są zupełnie jednakowe. Widzenie dwojgiem oczu, przy którem przedmioty przedstawiają się nam w istotnych warunkach przestrzeniowych, zowie się *stereoskopowem* (¹). Na zasadzie powyższych danych Wheatstone w roku 1838 zbudował przyrząd, za pomocą którego można widzieć na płaszczyznie wypukłe obrazy przedmiotów o trzech wymiarach. Przyrząd

---

(¹) Od dwóch greckich wyrazów, które oznaczają: *widzieć bryłowato*.

ten nosi nazwę *stereoskopu*, polega zaś na tem, że przed każdem okiem umieszcza się różny rysunek tego samego przedmiotu, jeden odpowiadający prawemu, drugi zaś lewemu oku, gdy patrzą one na ten przedmiot z małej odległości. Stereoskop tak jest ustawiony, że prawe oko widzi jedynie rysunek dlań przeznaczony, lewe oko również; oba obrazy w oczach zlewają się wtedy w naszej świadomości w jeden wypukły zupełnie tak samo, jak gdybyśmy patrzyli na sam przedmiot. Złudzenie jest wtedy zupełne i istotnie zadziwiające.

W stereoskopie Wheatstone'a oba obrazy nakładają się wskutek odbicia od dwóch zwierciadeł płaskich, w stereoskopie zaś Brewstera osiąga się to za pomocą dwóch soczewek zbierających. Oto budowa ostatniego przyrządu, obecnie najbardziej rozpowszechnionego: A i A', są to dwa szkła, stanowiące części pryzmatycznej soczewki, przez które oczy O i O' rozpatrują oba rysunki (fig. 388). Szkła są tak pochylone, że obraz punktu C jednego rysunku zlewa się z obrazem odpowiedniego punktu C' rysunku drugiego w miejscu C. To samo stosuje się do wszystkich pozostałych punktów obu rysunków a a' i b b', których obrazy zlewają się w a, b, tak, że gdy rysunki te są zrobione w powyżej podany sposób, oczy otrzymają wrażenie, jak gdyby światło przychodziło od właściwego przedmiotu. Najlepiej rysunki takie dają się przygotowywać za pomocą zdjęć fotograficznych. Stereoskop Brewster'a przedstawia nietylko tę korzyść, że daje obraz wypukły, ale powiększa jeszcze ten ostatni, co pozwala dokładniej badać pojedyńcze szczegóły. W celu dalszego ulepszenia przyrządu w tym kierunku, Helmholtz użył zamiast szkieł pryzmatycznych, układów soczewek, działających jak zwy-

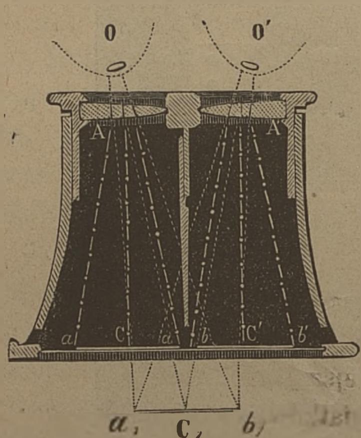


Fig. 388. Stereoskop Brewster'a. Przecięcie.

czajne mikroskopy, a to wespół z innemi jeszcze zmianami czyni przyrząd jego o wiele doskonalszym od prostszego odeń stereoskopu Brewster'a.

Za pomocą stereoskopu udało się wykazać, że gdy jedna ze siatkówek otrzymuje wrażenie pewnej barwy, druga zaś—wrażenie barwy dopełniającej do tamtej, wtedy widzimy tylko jednę barwę białą. Doświadczenie to należy urządzać w ten sposób, że umieszczone w głębi stereoskopu dwa krążki białe oświeca się dwiema wiązkami światła o barwach dopełniających i rozpatruje każdy krążek jednem okiem.

Dotychczas wspominaliśmy tylko w ogóle o wrażliwości siatkówki na światło, obecnie zaś musimy dodać, że wrażliwość owa nie jest wcale jednakową na całej przestrzeni tej błony. Istnieje na niej pewne miejsce, zupełnie niewrażliwe na ten bodziec, które wypada tam, gdzie nerw wzrokowy wchodzi do gałki ocznej i zowie się *ślepym punktem* oka. Dowodzi tego następujące np. doświadczenie, które każdy bardzo łatwo może wykonać. Rysuje się na papierze dwie czarne okrągłe plamy, odległe na 5 centym. i trzyma przed sobą tenże papier na odległości 15 centym.; gdy zamkniemy lewe oko, a prawem będziemy patrzyli na lewą plamę, nie dostrzeżemy plamy prawej, albowiem w wymienionych warunkach obraz jej pada na ślepy punkt. Przy innej odległości papieru, mniejszej lub większej, obydwie plamy są widoczne. Wrażliwość siatkówki jest największa na t. zw. *plamce żółtej*, znajdującej się na tylnym końcu średnicy gałki ocznej, idącej od przodu ku tyłowi, następnie maleje tak, że na poziomie równika tejże gałki jest 150 razy słabsza, niż na plamce żółtej. Wrażenie wywołane na siatkówce nie przemija w chwili oddalenia bodźca, lecz trwa jeszcze przez pewien czas. Wiadomo każdemu, że gdy obracamy np. węgiel rozżarzony, widzimy koło świetlne, albo gdy spadają duże krople deszczu, wydaje nam się, iż stanowią one nieprzerwaną żyłę wodną. Zjawiska podobne zależą od tego, że obraz węgla lub kropli, znajdujących się w danym punkcie, trwa jeszcze na siatkówce, gdy już na niej tworzy się ich obraz, odpowiadający innemu ich położeniu. Trwałość tego wrażenia zależy od stopnia wrażliwości

siatkówki oraz od natężenia światła. Dotyczy ona zarówno kształtu przedmiotów, jak i ich barwy, obracając bowiem krążki, podzielone na oddzielne wycinki o różnych barwach, otrzymujemy wrażenie barwy, stanowiącej ich mięszaninę, jak tego dowodzi np. doświadczenie z krążkiem Newtona (str. 499).

Co do wrażliwości oka na barwy, to pewne względy każą nam odrzucić przypuszczenie, podług którego odczuwamy różnemi zakończeniami nerwu wzrokowego najróżnorodniejsze barwne odcienie. Tak ścisły, że tak powiemy, podział pracy pomiędzy wszystkiemi oddzielnemi częściami siatkówki, z których każda byłaby zdolną reagować na jeden tylko rodzaj drgań świetlnych—nie istnieje. Teorya natomiast Young'a i Helmholtza przyjmuje, że w siatkówce znajdują się tylko trzy rodzaje włókien, w rozmaitym stopniu wrażliwe na wpływ trzech barw: czerwonej, zielonej i fioletowej, tworzących razem barwę białą. Jeden rodzaj jest szczególnie wrażliwy na barwę czerwoną, słabiej zaś daleko na pozostałe; drugi rodzaj najsilniej odczuwa zieloną, trzeci zaś fioletową. W taki sposób odbieramy *trzy zasadnicze wrażenia*, które zmieszane razem, lecz w danych chwilach nie jednakowo silnie, mogą powodować wszystkie wrażenia barw, do jakich oko nasze jest zdolne. Jedynie barwa biała powstaje przy jednakowej sile owych trzech zasadniczych wrażeń. Na korzyść tej teoryi przemawia np. fakt tak zwanej *ślepoty na barwy*, polegającej na tem, że niektóre osoby nie mogą odczuć pewnych barw (daltonizm). Najczęściej nie odczuwają oni barwy czerwonej. a w widmie dostrzegają tylko dwie barwy, zwane przez nich niebieską i żółtą. Wszystkie barwne wrażenia ich wyprowadzają się z zieleni i fioletu. Gdy wrażliwość na barwę czerwoną istnieje jeszcze u nich w mniejszym albo większym stopniu, napotykamy różne też stopnie ślepoty na tę barwę.

Gdy przez długi czas patrzymy na jaki barwny przedmiot, a następnie kierujemy wzrok na białą powierzchnię, otrzymujemy jeszcze wrażenie tamtej barwy, albo też wrażenie barwy do niej dopełniającej. Pierwsze pochodzi od tego, że poprzednie działanie trwa jeszcze, nawet po odwróceniu wzroku od

przedmiotu je powodującego, drugie zaś stanowi rezultat tego, że włókna nerwowe, szczególnie wrażliwe na barwę przedmiotu, męczą się i bardzo słabo reagują na wpływ jej w białem świetle, podczas gdy inne niezmęczone elementy siatkówki w normalny sposób ulegają działaniu barw pozostałych, co razem tworzy wrażenie barwy dopełniającej.

KSIĘGA CZWARTA.

CIEPŁO.

ROZDZIAŁ I.

Rozszerzanie się ciał od ciepła. Zmiana stanów skupienia.

§ 1. Zjawiska rozszerzania sie i kurczenia.

Gdy dotykamy jakiegoś ciała, to oprócz znanego wrażenia, jakie sprawia na nas budowa jego powierzchni, otrzymujemy jeszcze inne szczególnego rodzaju, które trudno daje się bliżej określić i które nazywamy wrażeniem *ciepła* lub *zimna*. Zależy ono zarówno od stanu samego ciała, jako też od chwilowego usposobienia naszego narządu zmysłowego. Jedno bowiem i to samo ciało może wywołać w nas różne, a nawet wprost przeciwne wrażenia, jeżeli będziemy go się dotykali w różnych momentach czasu; tłómaczymy sobie to zjawisko mówiąc, że albo ciało to *ogrzało się* lub *oziębiło*, albo też, że w naszym narządzie zmysłowym zaszły pewne zmiany, albo wreszcie przypisujemy różnicę wrażeń jednej i drugiej przyczynie. Jeżeli naprzykład na dłoni prawej położymy kawałek lodu, lewą zaś zanurzymy w wodzie gorącej, a po pewnym czasie zanurzymy obydwie w wodzie, mającej mniej więcej tę samą ciepłotę, co zwykłe powietrze pokojowe, to w prawej ręce uczujemy wrażenie ciepła, w lewej zaś—zimna. W tym wypadku różnica wrażeń, jakich

doznajemy, jest skutkiem różnych warunków, w jakich znajdowały się zakończenia nerwowe rąk naszych przed zanurzeniem ich w wodzie letniej. Albo gdybyśmy w danej chwili zanurzyli rękę w wodzie gorącej, wystawionej na oziębiające działanie otaczającego powietrza i po wyjęciu jej uczynili to samo po raz drugi, lecz po upływie pewnego dosyć długiego czasu, to doznalibyśmy również dwóch różnych wrażeń; powiedzielibyśmy wtedy, że, ponieważ nasza ręka nie uległa żadnym zmianom między pierwszem a drugiem zanurzeniem jej w wodzie, ta ostatnia musiała zmienić swą ciepłotę, czyli, że różnica wrażeń zależy w tym razie od samego ciała, którego się dotykamy.

Całą tę grupę wrażeń, która stanowi znaczną część ogólnej sumy naszych wrażeń codziennych, wraz ze wszystkiemi dotykowemi, niedawno jeszcze obejmowano jedną nazwą wrażeń czucia, mówiąc, że wchodzą one w zakres *zmysłu czuciowego*, w ostatnich jednak czasach zaczęto się bliżej zastanawiać nad tem, że wrażenia ciepła i zimna mają zupełnie odrębny charakter i bynajmniej nie są podobne do wrażeń, których przyczyną jest np. uderzenie, dotknięcie twardego przedmiotu, łechtanie skóry i t. p. Oddzielono tedy wrażenia ciepła i zimna od innych, tak samo odbieranych za pośrednictwem całej powierzchni ciała ludzkiego, i przyjęto dla nich t. zw. *zmysł temperatury*. Słusznie też znakomity fizyk angielski William Thomson mówi w jednym ze swych odczytów o „sześciu wrotach“ (t. j. sześciu zmysłach) ducha ludzkiego. Zobaczymy w dalszym ciągu niniejszej księgi, jakie znaczenie fizycy nadają samemu słowu: *temperatura;* tymczasem zaś przystąpimy do zbadania zjawisk, towarzyszących tym zmianom wrażeń, które dochodzą do naszej świadomości za pośrednictwem zmysłu temperatury, starając się zapoznać czytelnika z różnemi sposobami konstatowania i mierzenia tych zjawisk. Zobaczymy też, że zjawiska te są bardzo liczne i różnorodne i—że odgrywają nadzwyczaj ważną rolę w gospodarce przyrody.

Przyczynę naszych wrażeń, wchodzących w zakres zmysłu temperatury, przypisujemy pewnemu czynnikowi fizycznemu, który nazywamy *ciepłem*, odróżniając go od samego wrażenia

Дозволено Цензурою, Варшава 21 Апрѣля 1889 г.

Druk Jana Cotty w Warszawie, Senatorska 29.

Cena 20 kop.

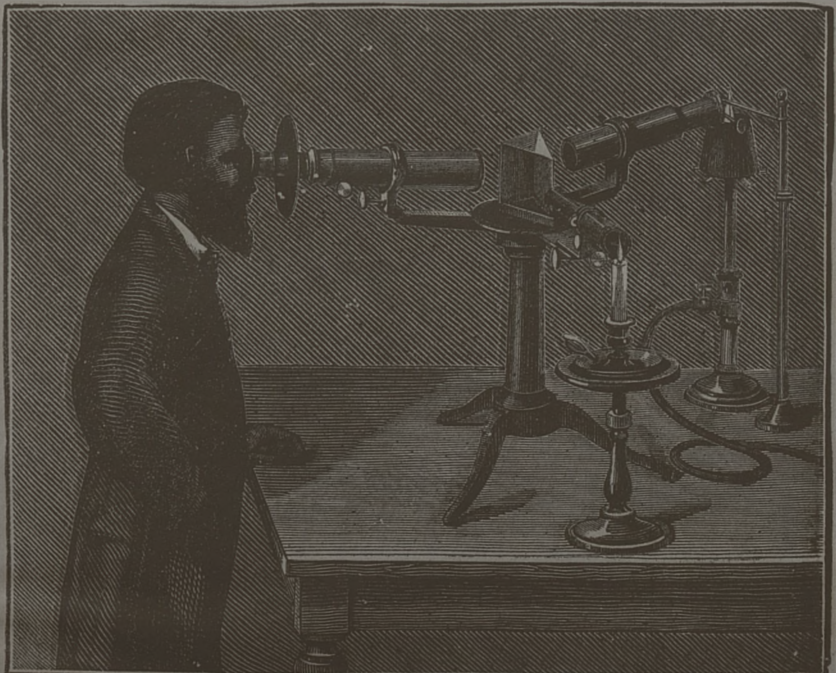
Zeszyt 21.

Cena 20 kop.

SIŁY PRZYRODY.

POPULARNY WYKŁAD FIZYKI

I GŁÓWNIEJSZYCH JEJ ZASTOSOWAŃ.



Spektroskop.

Podług dzieła A. Guillemin'a „Le monde physique"

OPRACOWALI

Józefowa Nusbaum

bak. n. prz.

i

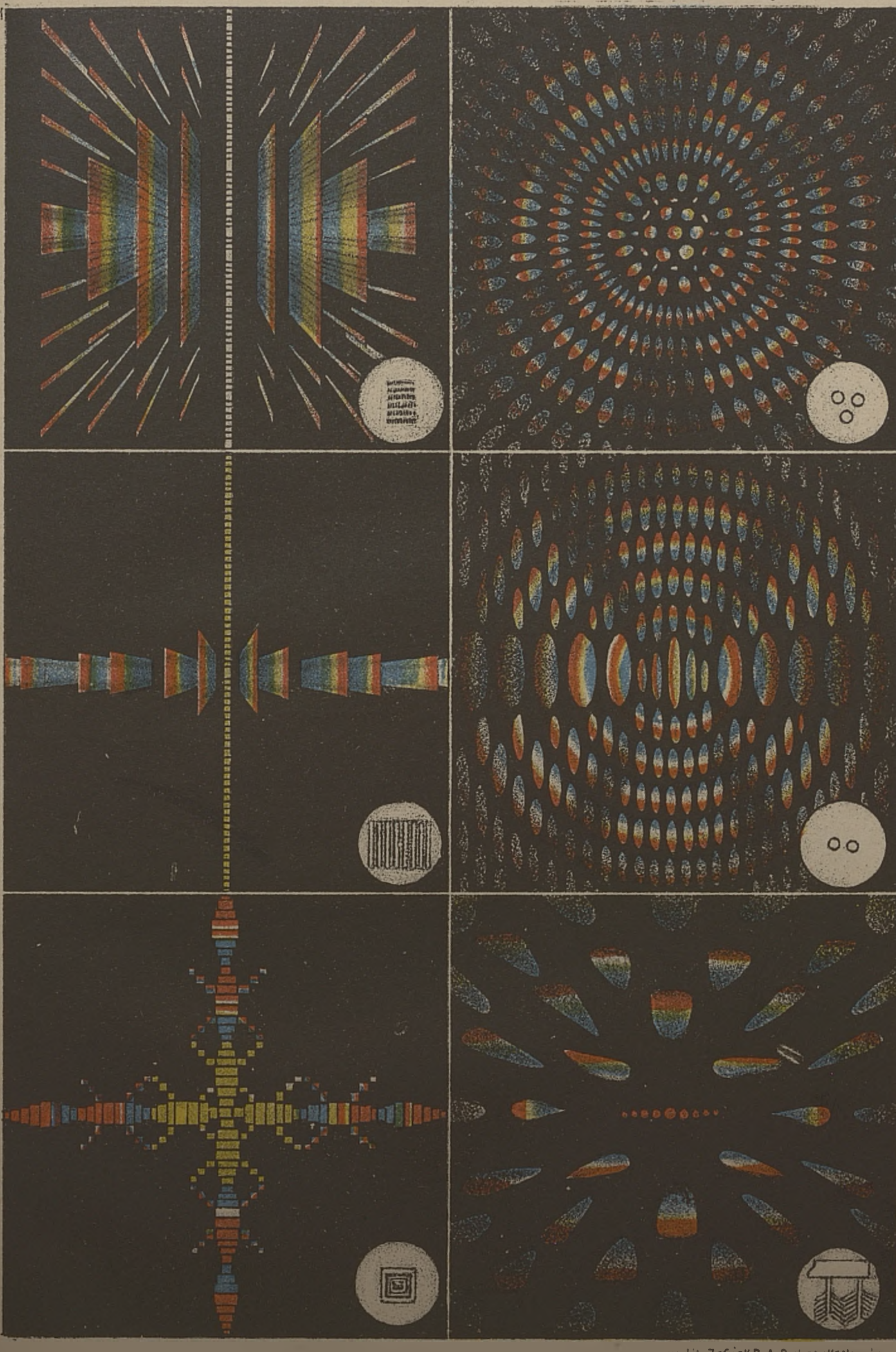
Henryk Silberstein

dr. fil., b. as. chem. przy un. w Bernie.

WARSZAWA.

Nakładem Księgarni **H. Olawskiego**, ul. Mazowiecka № 6.

1889.



w Lit. „Zofija" B. A. Bul[illegible]

VII. Zjawiska interferencyi.

Uginanie się światła przez siatkę.
Prążki wielobarwne.

ciepła, uważanego jako jeden z jego licznych objawów. Lecz pytaniem, czem właściwie jest ciepło zajmiemy się dopiero wtedy, gdy czytelnik pozna zjawiska cieplne oraz prawa z nich wynikające. Postaramy się z nich wyprowadzić istotę ciepła, podobnie jak na zjawiskach świetlnych oparliśmy teoryę światła.

Zachowując sobie, jak już wspomnieliśmy, ściślejsze określenie wyrazu temperatura do jednego z dalszych rozdziałów, obecnie powiemy tylko, że oznacza on stan ciepłoty danego ciała; im ono jest cieplejsze, tem wyższą jest jego temperatura, im zaś zimniejsze, tem ona jest niższą. Nasz zmysł temperatury nie daje nam, jak widzieliśmy, dokładnego pojęcia o stanie ciepłoty ciał, albowiem jedno i to samo ciało może posiadać dla nas bardzo rozmaitą temperaturę, zależnie od tego, jaką częścią ciała naszego dotykamy go się, jako też od temperatury tejże części. Dana ciecz np. może nam się wydać ciepłą, gdy zanurzymy w niej rękę, zimną zaś gdy weźmiemy ją w usta. Doświadczenie opisane na początku niniejszego paragrafu dowodzi, że za pomocą naszego zmysłu możemy odczuć jedynie różnicę w temperaturze ciała dotykanego i ręki, ciało cieplejsze od niej uważamy za ciepłe, zimniejsze zaś—za zimne. Ponieważ jednak ścisłe oznaczenie temperatury ciał jest konieczne przy badaniu zjawisk cieplnych, postarano się o środek, niezależny od naszego osobistego wrażenia. Polega on na zmianie objętości, jakiej pod wpływem zmiany temperatury doznają wszystkie ciała. Zmianę zaś temperatury możemy osiągnąć przez zetknięcie danego ciała z innem o różnej temperaturze; ciało cieplejsze udziela wtedy część swego ciepła ciału zimniejszemu. Bardzo proste doświadczenie pokaże nam, że objętość ciała się powiększa, gdy temperatura jego się podnosi, zmniejsza zaś gdy ta ostatnia się obniża. Ogrzejmy kulę metalową, która przy zwyczajnej temperaturze przechodzi dokładnie przez pierścień, nad płomieniem lampki spirytusowej, a zobaczymy, że po ogrzaniu kula nie przejdzie już przez tenże pierścień (fig. 389 str. 642). Przed ogrzaniem średnice kuli i pierścienia były równe, po ogrzaniu zaś średnica kuli stała się większą. Pozwólmy kuli powrócić do pierwotnej temperatury, a przekonamy się, że przejdzie ona znów przez pierścień, z czego wynika,

że wraz z oziębieniem objętość jej się zmniejszyła. Widzimy tedy, że zmiana objętości trwa tylko dopóty, dopóki trwa zmiana temperatury.

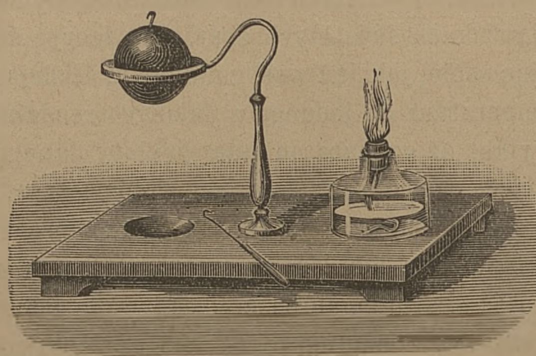


Fig. 389. Rozszerzanie się kuli pod wpływem ciepła.

Za pomocą przyrządu, przedstawionego na fig. 390, można jeszcze lepiej uwidocznić tę zależność wymiarów ciała od jego temperatury. Słupki *A* i *B*, silnie przymocowane do podstawy, są w górnej swej części przedziurawione, a przez otwory przechodzi pręt metalowy. Słupek *A* zaopatrzony jest w szrubę *C*, za pomocą której można jeden koniec pręta mocno przyszrubować; drugi zaś koniec przechodzi swobodnie przez otwór w słupku *B* i dotyka krótszego ramienia *a b* dźwigni *b a D*, której dłuższe ramie *a D* posuwa się po łuku, podzielonym na stopnie.

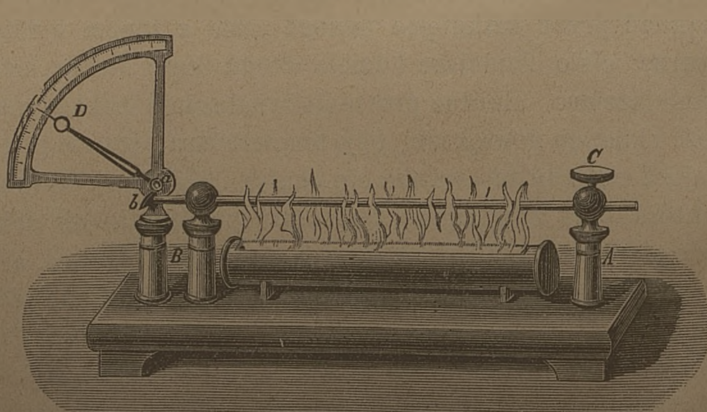


Fig. 390. Linijne rozszerzania się pręta.

Przyszrubujmy pręt przy pewnej określonej temperaturze w taki sposób, ażeby wskazówka D stała naprzeciwko zera podziałki. Jeżeli następnie będziemy ogrzewali pręt, wskazówka zacznie posuwać się ku górze i to tem wyżej, im silniejszem będzie ogrzewanie; wynika z tego, że przy podnoszeniu temperatury pręt się wydłuża. Gdy po odjęciu płomienia pozwolimy, ażeby pręt się oziębiał, zobaczymy, że wskazówka stopniowo opada, co dowodzi, iż pręt stopniowo także się kurczy. Wreszcie gdy temperatura jego stanie się równą tej, jaką miał na początku doświadczenia, wskazówka znów stanie naprzeciwko zera czyli, że długość pręta dojdzie wtedy do pierwotnej jego długości.

To cośmy dotychczas powiedzieli o ciele stałem, stosuje się także do ciał ciekłych i lotnych. Napełnijmy szklany balon, wydłużony w cienką rurkę, jakąś cieczą i zanurzmy go w naczyniu z wodą, mającą określoną temperaturę; przypuśćmy, że ciecz w rurce dochodzi wtedy do punktu a (fig. 391). Ogrzejmy wodę w naczyniu, a ciecz podniesie się w rurce tem wyżej, im cieplejszą będzie ta woda; dojdzie ona np. do punktu a'. Gdy następnie woda się oziębi i osiągnie pierwotną swą temperaturę, ciecz w rurce opadnie znów do punktu a. Objętość tedy cieczy powiększa się wraz z podwyższeniem, zmniejsza się zaś wraz z obniżeniem temperatury. Należy wszakże zauważyć, że ciecze rozszerzają się silniej, aniżeli ciała stałe, jak to wynika z opisanego doświadczenia. Gdy bowiem ogrzewamy wodę w naczyniu, balon również powiększa swą objętość i prze-

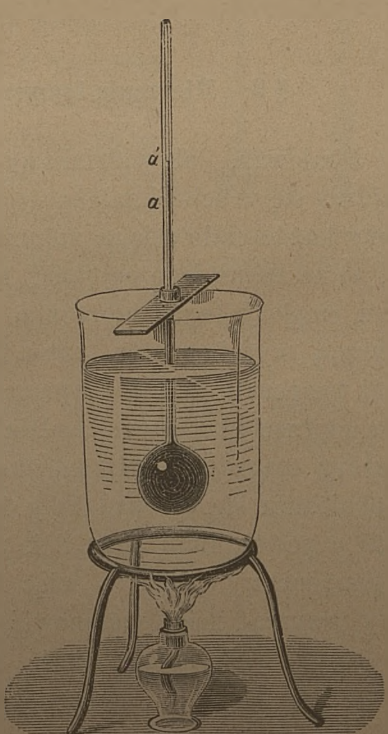


Fig. 391. Rozszerzanie się cieczy pod wpływem ciepła.

strzeń zajęta przez ciecz staje się większą. Obserwowane tedy przez nas rozszerzenie cieczy jest pozorne; stanowi ono różnicę pomiędzy jej istotnem rozszerzeniem i rozszerzeniem balonu.

Rozszerzania się gazów pod wpływem ciepła można dowieść za pomocą zupełnie podobnego doświadczenia, z tą tylko różnicą, że balon i część rurki wypełnione są, zamiast cieczy, powietrzem. Oprócz tego w rurce znajduje się kropla rtęci, której ruch ku górze lub ku dołowi wskazuje powiększanie, albo zmniejszanie się zamkniętego w przyrządzie gazu. Postępując w taki sam jak wyżej sposób przekonywamysię, że objętość danego gazu wzrasta przy podwyższaniu, maleje zaś przy obniżaniu jego temperatury i jednocześnie także spostrzegamy, że gaz rozszerza się silniej, aniżeli balon, a nawet aniżeli ciecz.

Do rozszerzalności ciał powrócimy jeszcze w niniejszym rozdziale.

§ 2. Mierzenie temperatury. — Termometry.

Ponieważ, jak widzieliśmy w poprzednim §, objętość ciał znajduje się w ścisłej zależności od ich temperatury, a z drugiej strony każde ciało osiąga stopniowo temperaturę swego otoczenia, to ze zmian jego objętości możemy wnioskować o zmianach stanu ciepłoty tegoż otoczenia. Do tego celu mógłby służyć przyrząd wyżej opisany (patrz fig. 390), należałoby tylko przy danej temperaturze tak przymocować pręt, ażeby wskazówka *D* stała naprzeciwko pewnej podziałki. Przy podnoszeniu się temperatury otaczającej wskazówka posuwałaby się ku górze, przy jej obniżaniu się — opadałaby ku dołowi. Przesunięcie wskazówki o pewną ilość podziałek mogłoby służyć za miarę zmiany temperatury pręta, a więc i jego otoczenia, czyli innemi słowy przyrząd mógłby stanowić *termometr*. Jako taki wszakże przedstawiałby tę niedogodność, że chcąc dostatecznie uwidocznić wydłużenie pręta, należałoby, z powodu małej rozszerzalności ciał stałych, wybierać pręty długie, które nadto potrzebaby łączyć z dźwignią. Dlatego też do oznaczenia temperatury uży-

wa się przyrządów, opartych na rozszerzalności cieczy, jak np. rtęć, albo też gazów, jak powietrze.

Termometr rtęciowy (fig. 392) składa się z małego kulistego lub walcowatego zbiornika szklanego, przedłużonego w bardzo cienką rurkę. W zbiorniku znajduje się nader czysta rtęć, która przy najniższej nawet temperatnrze wypełnia także część rurki. Powietrze z tej ostatniej wypędza się za pomocą ostrożnego gotowania rtęci w przyrządzie, poczem koniec rurki się zalutowuje. Gdy po oziębieniu rtęć w rurce opada, powstaje nad nią próżnia tak, że rozszerzanie jej odbywa się zupełnie swobodnie, to jest bez modyfikującego wpływu ciśnienia powietrza. Ponieważ średnica rurki jest bardzo mała w stosunku do zawartości zbiornika, to nader nieznacznej nawet zmianie objętości towarzyszy wyraźne podniesienie lub obniżenie się słupa rtęci w rurce. Ażeby zaś ze zmian wysokości tego słupa można było sądzić o zmianach objętości rtęci, przyrząd powinien być odpowiednio urządzony. Gdy rurka posiada wszędzie jednakową średnicę, wtedy przy jednakowej zmianie objętości wydłużenie słupa rtęci będzie jednakowe. Przypuśćmy, że długość rurki *począwszy od danego punktu*, podzielona jest na pewną ilość równych części. Jeżeli wysokość słupa rtęci zmienia się np. o 10 takich części, to wnioskujemy z tego, że zmiana objętości rtęci jest 10 razy większa, aniżeli w wypadku, gdy wysokość słupa tego zmienia się tylko o jedną część. Możemy tedy przyjąć, że zmiana wysokości słupa o 1, 2, 3... podziałki odpowiada zmianie temperatury, równej 1, 2, 3... stopniom. Widzimy więc, że na termometrze powinien być raz na zawsze oznaczony pewien stały punkt, od którego liczą się podziałki oraz oznaczona długość takiej jednej podziałki, odpowiadająca jednostce zmiany objętości rtęci czyli jednemu stopniowi. Osiąga się to przez obserwacyę

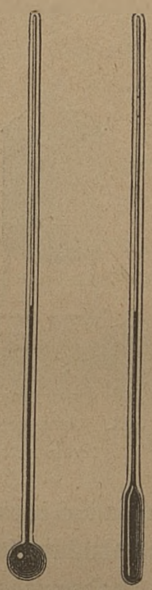


Fig. 392. Zbiornik i rurka rtęciowego termometru.

dwóch różnych i stałych temperatur. Jeżeli w naczyniu, napełnionem czystym, topniejącym lodem, umieścimy wyżej opisany termometr tak, ażeby zbiornik oraz część rurki były doskonale otoczone lodem (fig. 393), to poziom rtęci w rurce dojdzie do pewnego punktu, przy którym się zatrzyma i pozostanie tak długo, dopóki przyrząd będzie się znajdował w topniejącym lodzie. Temperatura bowiem tego ostatniego jest stałą, bez względu na temperaturę otaczającego powietrza oraz na stan barometru. Zgodzono się tedy ażeby miejsce, gdzie zatrzymuje się poziom rtęci w topniejącym lodzie, przyjąć za punkt, od którego liczą się podziałki; oznacza go się jako punkt topliwości lodu, albo *zero* stopni. Dodamy jeszcze nawiasowo, że dno naczynia, w którem znajduje się lód, powinno posiadać otwór, ażeby woda powstała ze stopienia lodu mogła swobodnie ściekać.

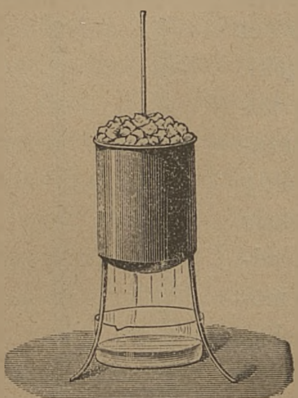


Fig. 393. Oznaczenie zera na termometrze.

Zaobserwowano dalej, że gdy zanurza się termometr w dystylowanej wodzie i ogrzewa tę ostatnią, rtęć w termometrze podnosi się tylko tak długo, dopóki woda nie zaczyna wrzeć. Począwszy od tej chwili, poziom rtęci zatrzymuje się stale na jednem i tem samem miejscu, gdzie pozostaje nawet przy silniejszem ogrzewaniu wody. Powtarzając to doświadczenie w rozmaitym czasie, przekonywamy się, że gdy ciśnienie barometryczne się zmienia, poziom rtęci w rurce termometrycznej też ulega zmianie, lecz przy jednym i tym samym stanie barometru temperatura wrzącej wody, a więc i poziom rtęci termometru w niej zanurzonego, jest stały. Zgodzono się tedy, ażeby za drugi stały punkt termometru uważać miejsce, gdzie zatrzymuje się rtęć wtedy, gdy przyrząd ten jest zanurzony w czystej wodzie, wrzącej przy ciśnieniu 760 milim.

Chcąc jednak ściśle oznaczyć na termometrze ten stały punkt, nie dosyć jest zanurzyć go w wodzie, wrzącej przy ci-

śnieniu 760 milim, albowiem na temperaturę wrzenia wody, oprócz ciśnienia barometrycznego, wpływają jeszcze inne czynniki. Dla prostoty jedynie przyjęliśmy wyżej, że przy tem samem ciśnieniu barometrycznem, temperatura wrzenia wody jest stała. W istocie zależy ona także, jak zobaczymy później, od czystości wody i materyału naczynia, w którem ciecz ta jest zawarta; oprócz tego temperatura wrzącej wody nie jest na całej głębokości jednakowa. Dlatego też, ażeby uniknąć wszelkich powodów do nieścisłości, zanurza się termometr w parze, wydobywającej się z wrzącej wody, temperatura bowiem tej pary jest stała, niezależnie od czystości wody i materyału naczynia, byle tylko ciśnienie barometryczne równało się 760 milim. Figura 394 przedstawia przyrząd, używany przy oznaczaniu punktu wrzenia na termometrze. Składa się on z naczynia *A*, zawierającego wodę oraz z osadzonego na nim cylindra *a a* o podwójnych ścianach, pomiędzy któremi pozostaje wolna przestrzeń. W przestrzeni wewnętrznej *C C* umieszcza się termometr, następnie ogrzewa wodę aż do wrzenia; uchodząca z niej do góry para otacza wtedy termometr i doprowadza go do temperatury wrzenia. W górnej części cylindra para, przez znajdujące się tamże otwory, wchodzi do zewnętrznej przestrzeni *B B* i otacza przestrzeń wewnętrzną *C C* tak, że ta ostatnia nie ulega oziębieniu. Osadzony z boku manometr *M* wskazuje prężność pary wewnątrz przyrządu. Termometr zanurza się tak głęboko, że gdy napełniająca go rtęć osiąga temperaturę wrzenia wody, słup rtęci w rurce wystaje nieco po nad korek, przytrzymujący termometr. Miejsce, do którego dochodzi wtedy poziom rtęci oznacza się jako punkt wrzenia wody, co zaś do liczby postawionej w tym punkcie, to, jak zaraz zobaczymy, jest ona rozmaita. Na termometrze Celsyusza punkt wrzenia wody oznacza się liczbą 100, pod warunkiem wszakże, że podczas doświadczenia ciśnienie barometryczne wynosi dokładnie 760 milim oraz, że manometr *M* wskazuje, iż prężność pary wewnątrz naczynia *A aa* jest równa ciśnieniu zewnętrznego powietrza. W razie zaś, gdy stan barometru jest inny, albo gdy manometr pokazuje, że prężność pary wewnątrz naczynia jest większa, aniżeli ciśnienie zewnętrznego

powietrza, wtedy należy wprowadzić odpowiednią poprawkę, albowiem temperatura wrzącej wody wynosi więcej niż 100 stopni przy silniejszem ciśnieniu i mniej przy słabszem. Tak np. przy ciśnieniu 787 milim. wynosi ona 101 stopni, przy ciśnieniu 733 milim. tylko 99 stopni.

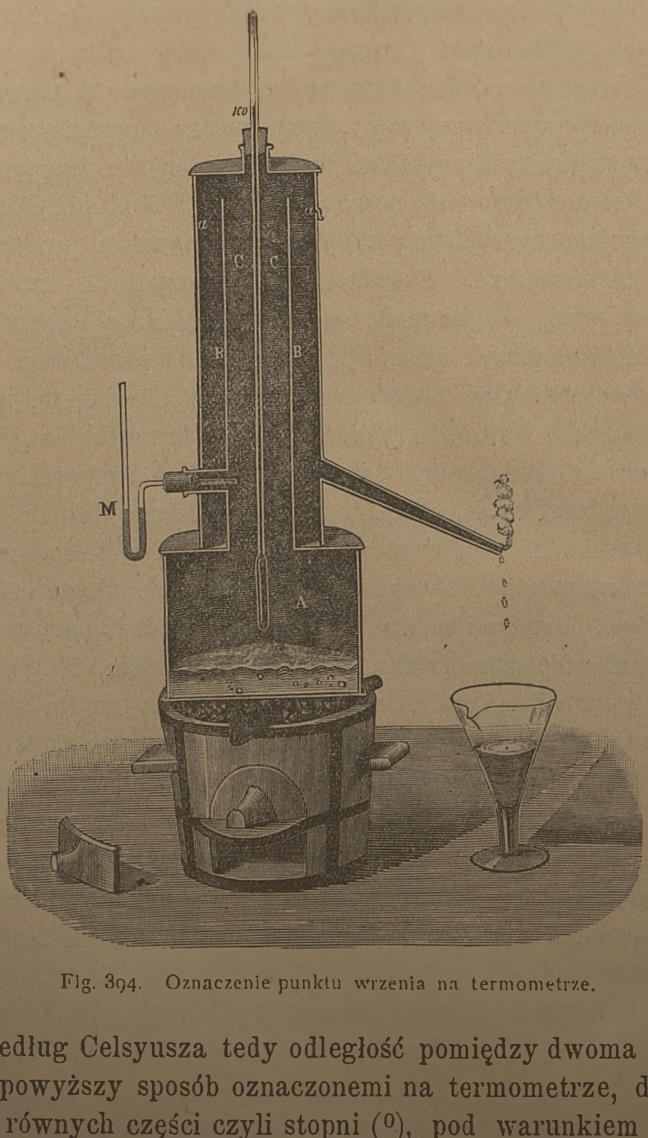


Fig. 394. Oznaczenie punktu wrzenia na termometrze.

Według Celsyusza tedy odległość pomiędzy dwoma punktami, w powyższy sposób oznaczonemi na termometrze, dzieli się na 100 równych części czyli stopni (°), pod warunkiem jednak,

że rurka termometryczna posiada wszędzie jednakową średnicę; podziałki takie oznacza się także poniżej 0^0 i powyżej 100^0, a to w celu mierzenia temperatur wyższych od temperatury wrzącej wody i niższych od temperatury topniejącego lodu. Skala wyryta jest na samej rurce termometrycznej, albo na rurce do niej przylutowanej lub też wreszcie na deseczce, do której termometr jest przymocowany (fig. 395).

W nauce termometr Celsyusza powszechnie prawie bywa używany; w codziennem zaś życiu używa się często termometru Reamur'a, który różni się od pierwszego tylko pod tym względem, że odległość pomiędzy dwoma stałemi punktami podzielona jest na 80 części, to jest że punkt wrzenia wody oznaczony jest liczbą 80. Punkty oznaczone zerem są na obu termometrach te same. Wynika z tego, że 1^0 Reamur'a wynosi $^{100}/_{80}$ albo $^5/_4$ Celsyusza, naodwrót 1^0 Celsyusza równa się $^4/_5$ Reamur'a. Zamiana tedy stopni jednych na drugie jest bardzo prosta, chcąc bowiem stopnie Reamur'a wyrazić w stopniach Celsyusza, należy pierwsze pomnożyć przez $^5/_4$; przy zamianie zaś stopni Celsyusza na stopnie Reamur'a mnoży się pierwsze przez $^4/_5$. Naprzykład 28^0 R. $= 28 \times {}^5/_4 = 35^0$ C; 35^0 C $= 35 \times {}^4/_5 = 28^0$ R.

Na skali termometrycznej Fahrenheit'a, używanej jeszcze obecnie w Anglii i północnej Ameryce, odległość pomiędzy dwoma stałemi punktami: topliwości lodu i wrzenia wody, jest podzielona na 180 stopni. Oprócz tego *zero* Fahrenheit'a znajduje się o 32 takich stopni poniżej zera Celsyusza i Reamur'a, w miejscu, gdzie zatrzymuje się poziom rtęci w topniejącej mięszaninie równych części śniegu i salmiaku. Punkt topliwości lodu na termometrze Fahrenheit'a oznaczony jest tedy 32^0, wrzenia zaś wody 212^0. Ponieważ odległość ta podzielona jest na 180^0, to 100^0 Celsyusza równa się 180^0 Fahrenheit'a czyli, że 1^0 C $= {}^{180}/_{100} = {}^9/_5$ F i naodwrót 1^0 F $= {}^5/_9{}^0$ C. Chcąc temperaturę daną w stopniach Fahrenheit'a wyrazić w stopniach Celsyusza, należy od pierwszej odjąć naprzód 32^0 a resztę pomnożyć przez $^9/_5$; naprzykład 120^0 F wynosi $(120^0 - 32) \times {}^5/_9 = 48\ {}^8/_9{}^0$ C. Przeciwnie przy zamianie stopni Celsyusza na stopnie Fahrenheit'a należy

pierwsze pomnożyć przez $^9/_5$ i do znalezionej liczby dodać 32; i tak 45^0 C $= (45 \times {}^9/_5) + 32 = 113^0$ F.

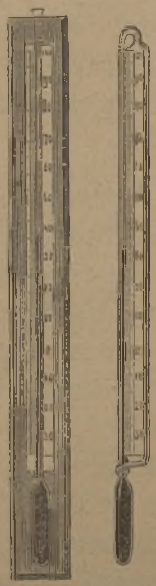


Fig. 395. Termometry stu-stopniowe.

W niektórych wreszcie krajach używa się skali Delisle'a, na której punkt wrzenia wody oznaczony jest 0^0, topliwości zaś lodu 150^0. Porównanie wymienionych czterech skal termometrycznych ułatwi czytelnikowi figura 396. Najwygodniejszą z nich jest skala Celsyusza, jej też będziemy się trzymali w dalszym ciągu nauki o cieple. Dodajmy jeszcze, że stopnie powyżej zera oznacza się znakiem $+$, poniżej zaś znakiem $-$.

Termometry, o których dotychczas wspominaliśmy, oparte są na rozszerzalności rtęci, zawartej w szklanem naczyniu. Należy przytem pamiętać, że gdy temperatura się podnosi, wtedy powiększa się nie tylko objętość rtęci, lecz także objętość szklanego naczynia. Gdyby szkło rozszerzało się w takim samym stosunku jak rtęć, ta ostatnia nie podnosiłaby się w termometrze, nawet przy możliwie wysokiej temperaturze; w istocie jednak rozszerzalność rtęci jest siedm i pół razy większa od rozszerzalności szkła tak, że przy wzrastającej temperaturze rtęć w rurce musi się podnosić, chociaż nie tak znacznie jak w wypadku, gdyby szkło wcale się nie rozszerzalo. Właściwie tedy obserwujemy nie istotne, lecz pozorne rozszerzanie się rtęci czyli, jak powiedzieliśmy wyżej, różnicę pomiędzy jej rozszerzalnością i rozszerzalnością szkła. Jeżeli przyjmiemy, że rozszerzanie się rtęci i szkła w pewnych granicach, pomiędzy któremi zwykle waha się temperatura, odbywa się zupełnie prawidłowo, to zgodzimy się i na to, że wskazówki różnych termometrów powinny zawsze być jednakowe, pod warunkiem że zostały starannie przygotowane i że dla każdego podział skali oparty jest na dwóch wyżej opisanych zasadniczych doświadczeniach. Jedynie przy nieco wyższych temperaturach rozmaite gatunki szkła rozszerzają się nie zupełnie je-

dnakowo tak, że chcąc wtedy porównywać wskazówki różnych termometrów, należy przynajmniej dbać o to, ażeby kulki termometrów były przygotowane z tego samego szkła.

Termometr wtedy tylko szybko wskazuje temperaturę, na jaką jest wystawiony, gdy ciepło w krótkim czasie przenika całą massę rtęci; w tym celu ścianki zbiornika powinny być możliwie cienkie, rtęć zaś powinna przedstawiać możliwie dużą powierzchnię. Dlatego też zbiornikowi częściej nadają kształt walca aniżeli kuli, albo też zamiast niego używa się rurki, skręconej spiralnie; zaleca się to szczególniej w wypadkach, w których chodzi o obserwacyę zmian temperatury, szybko po sobie następujących. Ażeby termometr był bardzo czuły, to znaczy, ażeby nader nieznacznej zmianie temperatury towarzyszyło widoczne podniesienie się lub obniżenie poziomu rtęci, objętość zbiornika w stosunku do średnicy rurki powinna być dosyć wielka. Walferdin zbudował termometry nadzwyczajnie czułe, które wskazywały zmianę temperatury równą jednej setnej stopnia. Przy oznaczaniu bardzo różnych temperatur, musiano w każdym pojedyńczym wypadku regulować ilość rtęci: do nizkich temperatur dole-



Fig. 396. Porównanie skal termometrycznych.

wano tej ostatniej, do wysokich zaś nieco odlewano. Rtęć poczyna wrzeć przy 350° i zamarza przy—39°. Są to więc dwie granice, po za któremi termometr rtęciowy staje się bezużyteczny. Oprócz tego doświadczenie pokazało, że rozszerzanie rtęci odbywa się prawidłowo—to jest proporcyonalnie do podwyższania temperatury—jedynie od—36° do 100° i że od 100° do 350° rozszerzalność jej wzrasta. Wynika z tego, że wskazówki termometru rtęciowego są dokładne tylko od—36° do 100°, dla temperatur zaś wyższych wskazówki te są przybliżone i pomyłka może nawet dochodzić do kilku stopni. Po za temi więc dwiema granicami należało zmodyfikować odpowiednie przyrządy, służące do określania stanu ciepłoty ciał. Dla nizkich temperatur modyfikacya polega na tem, że termometr napełnia się, zamiast rtęcią, alkoholem, który zwykle bywa zabarwiony, w celu łatwiejszego obserwowania ruchów słupa cieczy w rurce termometrycznej. Alkohol nie zamarza przy żadnej ze znanych dotychczas temperatur. Punkt topliwości lodu można oznaczyć na termometrze alkoholowym w taki sam jak powyższy sposób; punktu zaś wrzenia wody oznaczyć jak wyżej nie można dlatego, że alkohol wrze przy daleko niższej temperaturze, aniżeli woda. Chcąc przyrząd taki podzielić na stopnie, należy go umieścić w wodzie obok termometrów rtęciowych, wodę stopniowo ogrzewać lub oziębiać i kreślić na nim podziałki podlug wskazówek tychże termometrów. W istocie jednak takie termometry alkoholowe będą zawsze znacznie odstępowały od termometru rtęciowego, alkohol bowiem rozszerza się dosyć nieprawidłowo.

Można także zbudować termometry oparte na rozszerzalności i kurczliwości powietrza. Pierwsze w ogóle przyrządy, służące do mierzenia ciepła, polegały na tej zasadzie. I tak już Galileusz zbudował termometr (fig. 397 strona prawa), składający się ze szklanej kuli, do której przylutowana była szklana rurka; powietrze w tej ostatniej oddzielone było za pomocą kropli rtęci *A*, która służyła jako wskaźnik. Przesuwanie się jego wskazywało zmiany objętości zamkniętego powietrza, a więc i zmiany temperatury. Również i drugi przyrząd przedstawiony na fig. 397, wynaleziony przez Drebbel'a i stanowiący pierwszy

termometr, jaki wszedł w użycie, składał się ze szklanej kulki oraz z rurki, otwartym końcem zanurzonej w cieczy, napełniającej także część rurki. Nad cieczą w rurce i kuli znajdowało się powietrze, którego objętość zmieniała się przy zmianach temperatury; było to widoczne dzięki opuszczaniu się lub podnoszeniu słupa cieczy w rurce: gdy ono się rozszerzało, spychało ciecz tę ku dołowi, gdy się kurczyło, zewnętrzne powietrze pchało ją napowrót do góry.

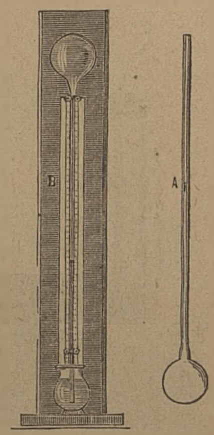


Fig. 397. Termometry powietrzne, podług Drebbel'a i Galileusza.

Czytelnik sam zrozumie braki podobnych przyrządów. W ogóle mówiąc, termometr powietrzny trudno urządzić w taki sam sposób, jak rtęciowy, dlatego, że rozszerzalność powietrza jest zbyt wielka, wynosi bowiem od punktu topliwości lodu do puuktu wrzenia wody $^1/_3$ pierwotnej objętości. Termometr powietrzny tak urządzony byłby za duży i niepraktyczny, zbudowano go też w odmienny sposób, którego jednak bliżej opisywać tutaj nie możemy.

Leslie i Rumford zbudowali przyrządy, pozwalające określić *różnicę* dwóch temperatur. Polegają one na rozszerzalności powietrza, na które nie wpływa zewnętrzne ciśnienie atmosferyczne. Obadwa składają się z dwa razy zgiętej szklanej rurki, do której na obu końcach przylutowane są szklane kulki (fig 398). W termometrze Leslie rurka zawiera kwas siarczany (zabarwiony na czerwono), którego poziom przy jednakowej temperaturze obu kulek jest w obu ramionach jednakowy i znajduje się na wysokości oznaczonej *zerem*. Gdy ogrzewa się jedną z kulek, rozszerzające się w niej powietrze spycha ciecz tak, że spada ona po tej stronie do punktu *b* np. podczas gdy po stronie przeciwnej podnosi się aż do *a*. Z odległości poziomu cieczy od zera można ocenić różnicę w temperaturze obu kulek, odległość ta bowiem jest podzielona na stopnie. Te ostatnie oznacza się na termometrze w taki sposób, że jedną z kulek ogrzewa się np. o 10^0 więcej, aniżeli drugą, stawia znak 10 tam, gdzie za-

trzymuje się poziom cieczy i odległość tego znaku od zera dzieli na dziesięć równych części, które stanowią stopnie. Stopnie takie stawia się następnie powyżej i poniżej zera na każdem ramieniu. Termometr Rumforda różni się od poprzedniego tylko

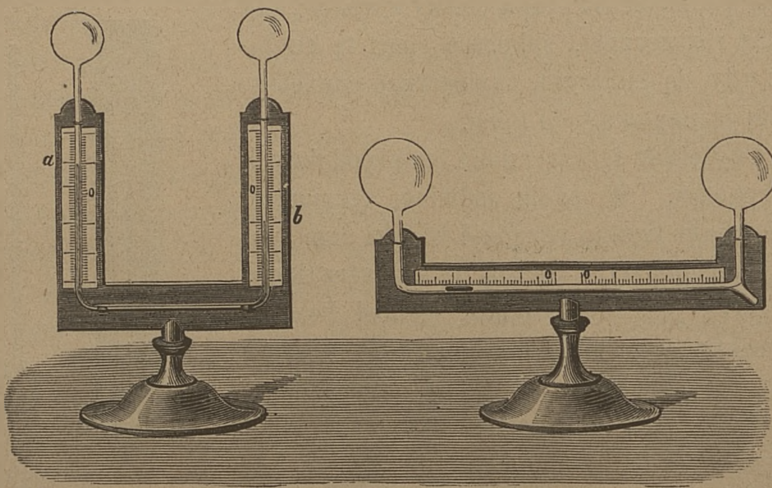


Fig. 398. Termometry różnicowe podług Leslie i Rumforda.

pod tym względem, że pozioma część rurki jest stosunkowo o wiele dłuższa i że napełniającą ją ciecz stanowi tylko krótki słupek rtęci, który znajduje się dokładnie pośrodku, gdy temperatura obu kulek jest jednakowa. Ponieważ za pomocą tych przyrządów nie można oznaczyć istotnej temperatury, lecz tylko różnicę w ogrzaniu dwóch kulek, otrzymały one nazwę *termometrów różnicowych* albo *dyfferencyalnych.*

Do określania temperatur spożytkowano także fakt niejednakowej rozszerzalności różnych ciał stałych. Przymocujmy do siebie na całej długości dwie sztabki metalowe, np. cynkową i miedzianą i ogrzewajmy otrzymaną w ten sposób sztabkę pojedyńczą, a zobaczymy, że ta ostatnia będzie się zginała (Fig. 399), albowiem cynk rozszerza się silniej, aniżeli miedź. W danym wypadku sztabka wygnie się tedy w stronę miedzi. Gdy sztabka się oziębi i powróci do pierwotnej temperatury, będzie znów prosta, przy dalszem zaś oziębianiu pocznie się wyginać w stro-

nę przeciwną, gdyż teraz cynk kurczy się bardziej od miedzi. Jeżeli obydwie sztabki metalowe są z samego początku zgięte i przytem bardziej rozszerzalny metal znajduje się na wewnątrz, to przy podnoszeniu temperatury zgięcie się zmniejsza, przy jej obniżaniu zaś powiększa się.

Na tej własności polegają termometry metalowe, służące nie tyle do dokładnego o z n a c z e n i a temperatury, ile do pokazania jej przyrostu lub ubytku. Jednym z najbardziej rozpowszechnionych jest termometr, którego budowa jest w zasadzie ta sama co w barometrze aneroidzie (patrz str. 157), tylko, że rurka która tam, będąc napełniona powietrzem, zgina się lub rozgina pod wpływem zewnętrznego ciśnienia, jest tutaj zastąpiona przez zgięty w łuk pasek metalowy (fig. 400), składający się z miedzi i stali, przylutowanych do siebie na całej długości. Jeżeli miedź znajduje się na wewnętrznej stronie łuku, stal zaś na zewnętrznej, to przy podnoszeniu temperatury, łuk się rozgina, ponieważ miedź rozszerza się wtedy silniej, aniżeli żelazo, przeciwnie przy jej obniżeniu łuk się zgina, gdyż wtedy miedź kurczy się silniej od żelaza. Ruch swobodnego końca łuku przenosi się, podobnie jak w barometrze aneroidzie, na strzałkę posuwającą się po cyferblacie. Skalę oznacza się na tym termometrze przez porównanie z termometrem rtęciowym. Termometr metalowy Breguet'a (fig. 401) składa się z paska metalowego, złożonego ze srebra, złota i platyny i skręconego spiralnie w ta-

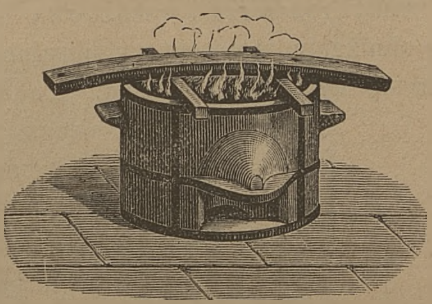


Fig. 399. Różna rozszerzalność dwóch metali.

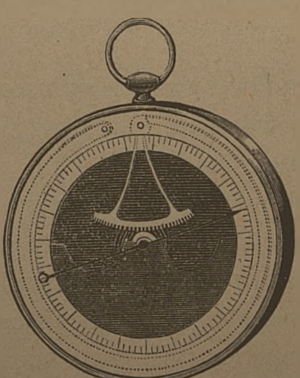


Fig. 400. Termometr metalowy.

ki sposób, że srebro, najbardziej rozszerzalne z trzech metali, znajduje się na wewnętrznej, platyna zaś na zewnętrznej stronie skrętów. Spiralna ta zawieszona jest pionowo; do dolnego jej końca przymocowana jest lekka wskazówka, poruszająca się wzdłuż podziałek, oznaczonych na cyferblacie. Gdy temperatura się podnosi, spiralna się rozkręca, albowiem srebro najbardziej się wtedy rozszerza i wskazówka porusza się w jedną stronę; przy obniżeniu temperatury spiralna się skręca i wskazówka porusza się w stronę przeciwną. Podziałki oznacza się na cyferblacie przez porównanie z termometrem rtęciowym. Ponieważ paski metalowe są nadzwyczaj cienkie, to zmiany temperatury wpływają bardzo szybko na całą ich masę tak, że przyrząd ten prawie momentalnie pokazuje te zmiany. Oprócz tego jest on w najwyższym stopniu czuły, a to z powodu nadzwyczajnej delikatności oddzielnych jego części.

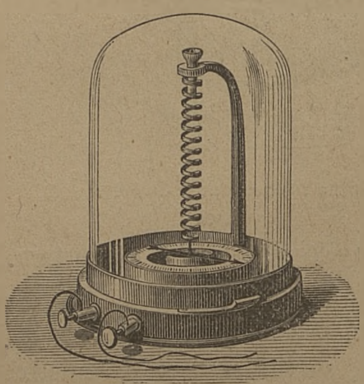


Fig. 401. Termometr metalowy Breguet'a.

Do mierzenia bardzo wysokich temperatur, naprzykład temperatury pieców lub ognisk, używa się przyrządów zwanych *pyrometrami*, w opis których nie będziemy się tutaj wdawali. Zauważymy jedynie, że polegają one po części na rozszerzalności metali, po części zaś na tej własności gliny, że objętość jej przy bardzo wysokiej temperaturze staje się coraz mniejsza. Dotychczas nie udało się pogodzić wskazówek pyrometrów ze wskazówkami termometrów rtęciowych i dlatego pierwszych nie należy uważać za bardzo dokładne. Chcąc dla wyższych temperatur osiągnąć większą dokładność, należy uciec się do rozszerzalności powietrza. W wielu razach, szczególniej przy obserwacyach meteorologicznych, potrzebną jest znajomość najwyższej lub najniższej temperatury, jaka panowała w danem miejscu lub czasie, której wszakże obserwator nie może określić przez ciągłe badanie termometru. W tym celu zbudowano przyrządy

samo zapisujące, które pokazują najwyższą lub najniższą temperaturę, na jaką były wystawione. Jednym z najdawniejszych przyrządów tego rodzaju jest *termometrograf* Rutheford'a (fig. 402), składający się z dwóch termometrów, poziomo przymocowanych wzdłuż skali. Jeden z nich *C D*, napełniony rtęcią, służy do oznaczenia maximum temperatury. W rurce termometrycznej

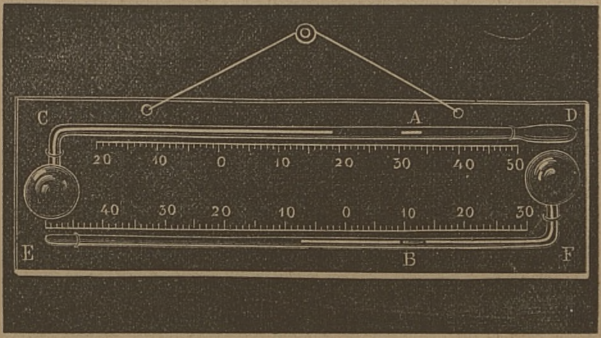


Fig. 402. Termometrograf Rutheford'a.

przed rtęcią znajduje się mały walec stalowy *A*, na końcach którego przylutowane są maleńkie kulki tak, że walec przesuwa się w rurce bez znacznego tarcia. Chcąc oznaczyć maximum temperatury, panującej w danym okresie czasu, należy przez pochylanie przyrządu tak długo przesuwać walec *A*, dopóki ten nie zetknie się dokładnie z końcem słupa rtęci w rurce. Gdy temperatura wzrasta, rozszerzająca się rtęć pcha przed sobą walec; gdy ona spada, rtęć się kurczy, lecz nie pociąga za sobą walca, który pozostaje tedy w miejscu, do jakiego doszedł podczas najwyższej temperatury rtęci. Ta podziałka na skali, przy której znajduje się koniec walca, zwrócony w stronę rtęci wtedy, gdy po niejakim czasie badamy termometr, pokazuje maximum temperatury, panującej w tymże czasie. Drugi termometr *E F*, służący do oznaczenia minimum temperatury, jest napełniony alkoholem; skala jego nakreślona podług termometru rtęciowego. W rurce znajduje się jeszcze mała szklana pałeczka *B*, zaopatrzona na końcu, zwróconym ku *E*, w mały guzik z czarnego szkła tak, że i ona przesuwa się bez tarcia o ścianki rurki termome-

trycznej. Przez odpowiednie pochylanie przyrządu można z łatwością zanurzyć całkowicie pałeczkę w alkoholu, przyczem ów guzik powinien znajdować się dokładnie na poziomie słupa cieczy w rurce. Gdy następnie temperatura spada i alkohol się kurczy, pociąga on za sobą pałeczkę, a to dzięki przyciąganiu pomiędzy nim i guzikiem; gdy temperatura znów się podnosi, alkohol rozszerzając się, przepływa mimo pałeczki i pozostawia ją w miejscu. Podziałka, przy której leży szklany guzik, pokazuje minimum temperatury, jaka panowała w przeciągu czasu od nastawienia przyrządu do chwili obserwacyi. [1])

Użycie tego przyrządu ogranicza się do obserwacyj, przy których nie potrzeba go przenosić, albowiem najsłabsze wstrząśnienie zmienia już położenie pałeczek, a więc czyni niedokładnemi jego wskazówki. Nie nadaje się on np. do mierzenia stopniowego przyrostu temperatury wnętrza ziemi w miarę głębokości. W tym celu zbudowano inny termometr maximalny. Jest to zwykły termometr, którego koniec jednak nie jest zalutowany, lecz wydłużony w delikatny wierzchołek. Napełnia się go tak, ażeby przy pewnej temperaturze T rtęć akuratnie dochodziła w nim do wierzchołka i w sposób zwykły oznacza na nim punkt zera. Odległość tego ostatniego od wierzchołka dzieli się następnie na stopnie zupełnie tak samo jak w zwykłym termometrze. Gdy przyrząd zostaje wprowadzony do jakiegoś miejsca, o temperaturze wyższej niż T, przy której rtęć dochodziła do wierzchołka, pewna ilość tej cieczy wypływa. Wynika z tego, że gdy on spadnie znów do temperatury T, pozostała rtęć nie będzie już w nim dochodziła do wierzchołka, do którego sięgała przy najwyższej temperaturze, na jaką przyrząd był wystawiony. Ażeby znaleść tę temperaturę, należy tylko przyrząd ogrzewać dopóty, dopóki pozostała rtęć nie dojdzie w nim do wierzchołka i zanotować przy jakiej temperaturze to ma miejsce. Ta ostatnia jest właśnie szukaną temperaturą. Istnieje także termometr minimalny, zbudowany na podo-

---

([1]) Wüllner, Lehrbuch der Experimental physik.

bnej zasadzie, lecz nie tak prosty w użyciu. Termometry te służą głównie do oznaczania najwyższej lub najniższej temperatury głębin jezior, mórz lub studni. Wszystkie termometry, jakie dotychczas opisaliśmy, pokazują, ściśle mówiąc, jedynie temperaturę tych ciał, które ulegają w przyrządach tych rozszerzeniu, tymczasem my posiłkujemy się termometrami w celu mierzenia temperatury ciał stałych, ciepłych lub gazowych, z któremi je stykamy. Chcąc więc z przybliżoną chociażby dokładnością sądzić o tej ostatniej z temperatury, jaką pokazuje termometr, należy koniecznie przedsięwziąć pewne środki ostrożności. Gdy mierzymy temperaturę ciała lotnego lub cieczy, należy zanurzyć w nich cały termometr; jeżeli jest on dostatecznie czuły i masa jego jest nieznaczna w stosunku do masy ciała badanego, to możemy przyjąć, że temperatura, jaką wskazuje termometr wtedy, gdy poziom rtęci w nim się ustalił, jest równą temperaturze danego środka. Chcąc zbadać temperaturę ciała stałego, wyżłabia się w nim zagłębienie dostatecznie duże, tak, ażeby można było w niem pomieścić przynajmniej kulkę termometru; lepiej jeszcze zagłębienie napełnić rtęcią i gdy przyjmie ona temperaturę badanego ciała, zanurzyć w niej termometr. W każdym jednak razie niezbędnem jest, ażeby termometr był mały w stosunku do mas, których temperaturę oznaczamy; ponieważ pomiędzy dwoma stykającemi się ciałami ma miejsce ustawiczne wyrównywanie ich stanu ciepłoty, to i termometr nie pokazuje tej temperatury, jaką pierwotnie posiadała badana masa, lecz temperaturę, która się utworzyła po wyrównaniu z temperaturą termometru. Ażeby wskazówka ta nie bardzo się różniła od pierwotnej temperatury badanego środka, masa termometru powinna być niezbyt wielka. Błąd ten w zupełności usunąć się nie daje, należy tylko starać się o to, ażeby sprowadzić go do możliwego minimum.

Oprócz tego termometry, nawet te, które zostały przygotowane z jak największą starannością, mogą być przyczyną pomyłki, o której należy tutaj wspomnieć. W przyrządach tych mianowicie zero niekiedy się podnosi, czyli innemi słowy, gdy termometr jest zanurzony w topniejącym lodzie, rtęć nie obniża

się w nim, aż do punktu, oznaczonego na skali 0^0. Sądzono z początku, że jest to skutek zmniejszenia się objętości naczynia termometru, które to zmniejszenie stanowić miało jakoby rezultat ciśnienia zewnętrznego na przyrząd, pozbawiony wewnątrz powietrza. Skonstatowano jednak później, że to nie jest istotną przyczyną. Obecnie objaśniamy przemieszczenie zera pewnym procesem, jaki się odbywa pomiędzy cząstkami szkła wtedy, gdy podczas przygotowywania termometru zostało ono najprzód doprowadzone do temperatury wrzenia rtęci, a następnie szybko oziębione. Dzięki procesowi temu objętość zbiornika termometru się powiększa; następnie powraca on z czasem do pierwotnej swej objętości, wskutek czego zero się podnosi. Odbywa się to bardzo powoli, podług bowiem obserwacyj Despretz'a, zero podnosi się w ciągu kilku lat. Dlatego też należy koniecznie sprawdzać od czasu do czasu położenie zera na termometrze.

§ 3. Rozszerzalność ciał stałych.

Poznaliśmy wyżej ogólny fakt, że ciała się rozszerzają pod wpływem ciepła, obecnie zaś zjawia się przed nami pytanie, w jakiej mierze rozszerzanie to się odbywa, to jest jaki istnieje stosunek pomiędzy przyrostem objętości ciała i podnoszeniem się jego temperatury. Badania nasze rozpoczniemy od rozszerzalności ciał stałych. Gdy ogrzewamy np. sztabę rozszerza się ona w kierunku wszystkich trzech swoich wymiarów, to jest staje się dłuższa, szersza i grubsza.

Jeżeli sztaba przy temperaturze topniejącego lodu to jest 0^0 posiada długość d, to przy innej, wyższej temperaturze posiada długość większą. Przypuśćmy, że przy temperaturze 100^0 długość ta równa d', to oczywiście, iż różnica pomiędzy tą późniejszą długością d' i pierwotną d stanowi wydłużenie całej sztaby przy ogrzaniu jej na 100^0. Jednostka długości sztaby ulega przy tem samem ogrzaniu d razy mniejszemu wydłużeniu, które oznaczamy przez k; jest ono wyrażone pod postacią ułamka pierwotnej długości ciała. Otóż to wydłużenie, jakiemu ulega jednostka dłu-

gości przy ogrzaniu jej na pewną określoną ilość stopni (w danym razie przyjmujemy 100°) zowie się *spółczynnikiem linijnej rozszerzalności.* Ponieważ przy ogrzaniu od temperatury topniejącego lodu do temperatury wrzenia wody jednostce długości przybywa k, d zaś jednostkom przybywa d razy więcej to jest $d\,k$, to długość d' po ogrzaniu można wyrazić w sposób następujący: $d' = d + dk$, a wyrzucając d' za nawias mamy $d' = d\,(1 + k)$.

Rozszerzanie w kierunku szerokości odbywa się zupełnie w tym samym stosunku, pod warukiem jednak, że sztaba jest jednorodną. Jeżeli szerokość sztaby przy temperaturze 0° jest równa s, to oznaczywszy szerokość przy 100° przez $\acute{s}$, mamy $\acute{s} = s + s\,k$, albo $\acute{s} = s\,(1 + k)$. Wreszcie to samo dotyczy rozszerzania w kierunku trzeciego wymiaru, to jest grubości, jeżeli tylko sztaba jest zupełnie jednorodna. Oznaczywszy grubość jej przy 0° przez g, grubość zaś przy 100° przez g' mamy $g' = g + g.\,k$ czyli $g' = g\,(1 + k)$.

Ponieważ objętość ciała jest równa iloczynowi z trzech jego wymiarów, to objętość sztaby przy 0° jest równa $d.\ s.\ g.$ Przy temperaturze zaś 100° objętość równa $d'.\ s'.\ g'$ albo według powyższego równa $d.\,(1 + k).\ s\,(1 + k).\ g\,(1 + k)$. Widzimy, że w tym ostatnim iloczynie czynnik $(1 + k)$ jest dwa razy pomnożony przez siebie samego czyli, że jest podniesiony do sześcianu, co oznacza się przez $(1 + k)^3$ i co po wykonaniu daje $1 + 3k + 3k_2 + k^3$. Otóż doświadczenie pokazuje, że spółczynnik rozszerzalności k jest zawsze bardzo mały; jego więc kwadrat k^2 i jego sześcian k^3 stanowią ułamki tak drobne, że wyrażenia $3k^2$ i k^3 możemy odrzucić i bez popełnienia znaczniejszego błędu zamiast całkowitego sześcianu czynnika $1 + k$ wziąć jedynie początkowe dwa wyrażenia to jest $1 + 3k$. Ostatecznie tedy objętość $d'.\ s'.\ g'$ przy 100° jest równa $d.\ s.\ g \times (1 + 3k)$ albo też po zniesieniu nawiasu równa $d.\ s.\ g + d.\ s.\ g.\ 3k$. Wielkość $3k$ wyraża rozszerzenie, jakiemu ulega jednostka objętości przy ogrzaniu od temperatury topnienia lodu do temperatury wrzenia wody; stanowi on *spółczynnik rozszerzalności objętościowej* albo *sześciennej*, który, jak widzimy, jest równy *potrójnemu spółczynnikowi rozszerzalności linijnej.* Ostatnie

zaś równanie, wyrażające objętość późniejszą za pomocą objętości pierwotnej więcej całkowite rozszerzenie, pokazuje, że rozszerzenie to jest tyle razy większe od spółczynnika rozszerzalności sześciennej, ile razy cała objętość $d.\ s.\ g$ jest większa od jednostki objętości.

Oprócz spółczynników linijnej i sześciennej rozszerzalności podaje się jeszcze spółczynnik rozszerzalności płaszczyzny, który wyraża rozszerzenie, jakiemu ulega jednostka płaszczyzny przy ogrzaniu jej od temperatury topniejącego lodu do temperatury wrzenia wody. Za pomocą takiego samego jak powyższe rozumowania można pokazać, że płaszczyzna równa przy 0^0 iloczynowi z długości d przez szerokość s, to jest $d.\ s$, równa przy 100^0 temuż iloczynowi więcej całkowite rozszerzenie czyli $d.\ s\ (1+2k)$. Widzimy, że ten spółczynnik jest równy *podwójnemu spółczynnikowi rozszerzalności linijnej.*

Z powyższego wynika tedy, że przy badaniu rozszerzalności ciał wystarcza oznaczenie spółczynnika linijnego, mnożąc go bowiem przez dwa lub trzy otrzymujemy pozostałe dwa spółczynniki. Gdy ogrzejemy sztabę od temperatury topniejącego lodu do innej jakiej temperatury t, różnej od 100^0, długość jej po ogrzaniu nie będzie równa d', lecz będzie miała wartość inną, którą oznaczymy przez d_t. W tym wypadku możemy także znaleść spółczynnik rozszerzalności, to jest wydłużenie, jakiemu ulega jednostka długości przy ogrzaniu jej od 0^0 do t^0. Spółczynnik ten, jak wyżej, oznaczamy przez k, dla pokazania wszakże, że w danym razie ciało zostało ogrzane od 0^0 do t^0, stawiamy u dołu litery k odpowiedni znaczek (k_t). Długość sztaby po ogrzaniu od 0^0 do t^0 jest równa pierwotnej długości więcej całkowite wydłużenie, czyli $d_t = d\ (1 + k_t)$.

Widzieliśmy w poprzednim paragrafie, że termometr rtęciowy pozwala nam mierzyć temperaturę za pomocą pozornej rozszerzalności rtęci. Powiadamy, iż temperatura podniosła się o 1^0, gdy rtęć uległa $^1/_{100}$ tego rozszerzenia, jakiemu ulega przy ogrzaniu od 0^0 do temperatury wrzenia wody i twierdzimy, że podniosła się o t^0 gdy rtęć uległa $t/_{100}$ tegoż rozszerzenia. Mówimy np. że temperatura podniosła się o 25^0 Celsyusza, gdy

rtęć w tym termometrze uległa $^{25}/_{100}$ tego rozszerzenia, jakiemu ulega przy ogrzaniu od temperatury topliwości lodu do temperatury wrzenia wody. Jeżeli tedy ciała stałe rozszerzają się pod wpływem ciepła w takim samym stosunku jak rtęć, to wydłużenie sztaby przy ogrzaniu od 0^0 do t^0 jest równe $t/_{100}$ tego wydłużenia, jakiemu sztaba ulega przy ogrzaniu od 0^0 do 100^0. Gdybyśmy spółczynnik k rozszerzalności linijnej, oznaczający przyrost długości, jakiemu ulega jednostka sztaby przy ogrzaniu jej od 0^0 do 100^0, podzielili przez 100, otrzymalibyśmy przyrost α przy ogrzaniu od 0^0 do 1^0. Ponieważ zaś przyjmujemy, że rozszerzanie się sztaby jest dokładnie proporcyonalne do wzrostu temperatury, wynika z tego, że i spółczynnik k_t, wyrażający wydłużenie jednostki długości przy ogrzaniu od 0^0 do t^0, podzielony przez t, daje tę samą wartość α, którą nazwiemy spółczynnikiem rozszerzalności linijnej przy ogrzaniu od 0^0 do 1^0. Znając ten ostatni spółczynnik możemy z łatwością znaleść całkowity przyrost długości, jakiemu ulega sztaba przy ogrzaniu jej od 0^0 do temperatury t^0. Jeżeli bowiem długość ta przy zerze stopni jest równa d, to przy temperaturze 1^0 jest równa tejże długości więcej całkowity przyrost czyli równa $d + d\,\alpha$; przy temperaturze zaś t^0 przyrost jest t razy większy tak, że wtedy długość $d_t = d + d\,\alpha\,t$, a po wyrzuceniu za nawias $d_t = d\,(1 + \alpha\,t)$.

Obecnie przystąpimy do zbadania czy istotnie rozszerzalność jest proporcyonalna do temperatury, mierzonej za pomocą rtęciowego termometru oraz do opisu metod, jakiemi uczeni posługiwali się przy oznaczeniu spółczynnika rozszerzalności rozmaitych ciał.

Przy dawniejszych doświadczeniach nad rozszerzalnością ciał pod wpływem ciepła posługiwano się przyrządami podobnemi w zasadzie do przyrządu przedstawionego na fig. 390 (str. 642). Pierwsi, którzy użyli dokładniejszej metody, byli Lavoisier i Laplace. Oto opis przyrządu, jakim uczeni ci się posługiwali. Pomiędzy czterema silnemi i nieruchomo stojącemi słupami N N (fig. 403) zbudowany był ceglany piec, na którym stała wanna C. W tej ostatniej umieszczano badaną sztabę S. Jeden jej koniec mocno przylegał do nieruchomego słupka B', posta-

wionego pionowo w wannie i przymocowanego do ramienia $b'b$, drugi zaś koniec sztaby przylegał do słupka B (co oddzielnie jest przedstawione na rysunku), tak samo schodzącego pionowo ku wannie i przymocowanego do ramienia $a'\,a$. Ramię $a'\,a$ nie by-

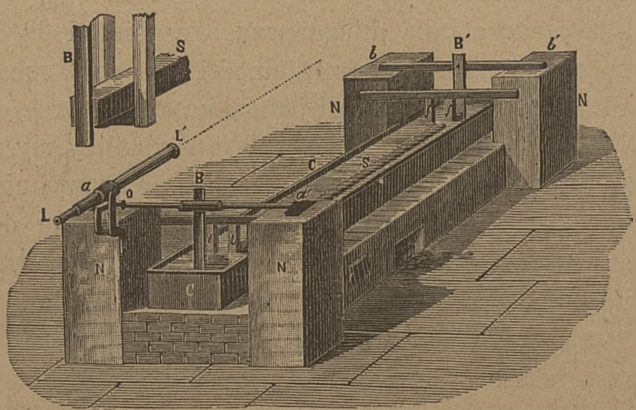


Fig. 403. Przyrząd Lavoisier'a i Laplace'a, służący do mierzenia rozszerzalności ciał stałych.

ło, tak jak ramię $b'\,b$, stale przymocowane do podtrzymujących je słupów, lecz mogło się obracać. Wraz z ramieniem $a'\,a$ osadzona na jego końcu luneta $L'\,L$ poruszała się w taki sposób, że gdy ramię to przy rozszerzeniu badanej sztaby obracało się w jednym kierunku, koniec L lunety podnosił się, gdy zaś ramię to obracało się w kierunku przeciwnym, tenże koniec ulegał opuszczeniu.

Lunetę skierowywano na pionową skalę, oddaloną w przybliżeniu na 200 metrów tak, że można było dokładnie obserwować, jaka podziałka znajdowała się na przedłużeniu optycznej osi lunety (fig. 404). Przy obracaniu się lunety widać przez nią coraz inne podziałki; doświadczenie zaś pokazało, że gdy dolny koniec słupka B, o który opierała się badana sztaba, przesuwał się o 1 milim. i zajmował np. położenie P, wtedy luneta obracała się na tyle, że jej oś optyczna przebiegała wzdłuż skali 744 milimetry.

Z początku napełniano wannę C wodą oziębioną do temperatury zamarzania i doprowadzano sztabę S do 0^0. Poczem dłu-

gość jej mierzono dokładnie i obserwowano podziałkę skali, widoczną wtedy przez lunetę. Następnie dopiero zapalano w piecu i ogrzewano wodę w wannie. Ponieważ jeden koniec sztaby silnie przylegał do nieruchomego słupka B', to rozszerzenie jej ujawniało się jedynie na drugim końcu, przylegającym do ruchomego słupka B i mogło być odczytywanem na skali. Należało tylko odległość, jaką wzdłuż skali przebiegała oś lunety, podzielić przez 744, ażeby otrzymać wielkość na jaką przesuwał się dolny koniec słupka B, a więc ażeby otrzymać wydłużenie sztaby. Stosunek tego wydłużenia do pierwotnej długości sztaby pozwala obliczyć spółczynnik rozszerzalności linijnej przy danej temperaturze t, mierzonej za pomocą rtęciowego termometru. Na podstawie licznych doświadczeń Lavoisier i Laplace dowiedli, że gdy ciało, ogrzane od zera do punktu wrzenia wody, powraca następnie do temperatury 0^0, przybiera napowrót swą pierwotną długość. Dalej pokazali, że pomiędzy 0^0 i 100^0 rozszerzalność jest proporcyonalna do temperatury, czyli, że istotnie spółczynnik k znaleziony przy ogrzaniu na 100^0 i podzielony przez sto, albo też spółczynnik k_t, znaleziony przy ogrzaniu na t^0 i podzielony przez t, dają tę samą wartość α, którą otrzymujemy przy ogrzaniu na 1^0 i którą nazwaliśmy spółczynnikiem rozszerzalności linijnej przy ogrzaniu od 0^0 do 1^0.

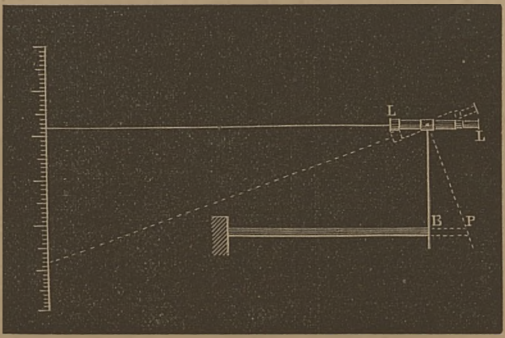


Fig. 404. Mierzenie rozszerzalności ciał stałych. Zasada metody Lavoisier'a i Laplace'a.

Chcąc przy opisanej metodzie znaleść wspomnianą wyżej cyfrę 744, to jest chcąc znaleść stosunek pomiędzy odległością, jaką wzdłuż skali przebiega oś lunety i wydłużeniem sztaby, trzeba było dokonywać mierzeń bardzo delikatnych i łatwo podlegających ważnym pomyłkom, których można uniknąć przy użyciu metody Ramsdena. Metodą tą posługiwał się Roy w roku 1784

w celu określenia rozszerzalności pewnych miar; polega ona na następującem. Trzy metalowe wanny *A*, *B*, *C* (fig. 405) są ustawione równolegle do siebie na żelaznych podstawach; dwie zewnętrzne *A* i *C* są napełnione lodem, środkowa zaś *B* zawiera wodę i może być ogrzaną za pomocą lampek spirytusowych. W każdej wannie znajduje się sztaba metalowa, mająca 2 metry długości. Sztaby zewnętrzne utrzymywane stale przy temperaturze 0°, mają też stałą długość, podczas gdy sztaba środkowa podlegająca badaniu i ogrzewana lub oziębiana, wydłuża się albo kurczy. Na obu końcach każdej z tych sztab znajduje się pionowy słupek metalowy. Na słupkach w *A'* i *A''* osadzone są siat-

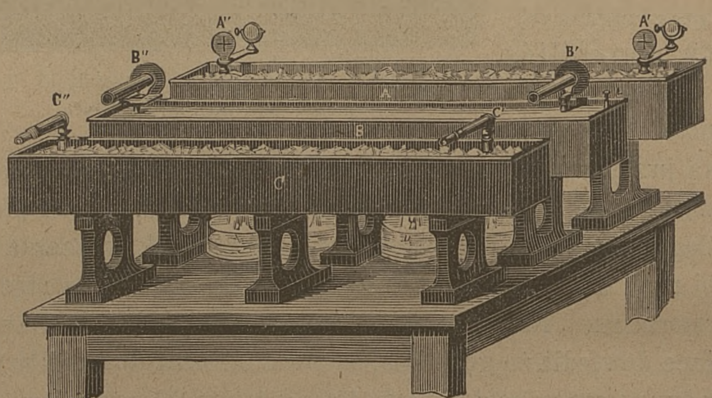


Fig. 405. Przyrząd Ramsden'a.

ki z dwóch cienkich nitek, przecinających się pod kątem prostym; siatki te są oświecone za pomocą małych zwierciadeł. Na każdym końcu sztaby podlegającej badaniu to jest w *B'* i *B''* znajduje się część mikroskopu, zawierająca objektyw; wreszcie na końcach drugiej zewnętrznej sztaby, to jest w *C'* i *C''* osadzone są części, zawierające okular i siatkę z nitek tak, że *C'* i *B'* oraz *C''* i *B''* stanowią razem jeden całkowity mikroskop. Jeżeli z każdej strony oś optyczna rury, zawierającej okular stanowi przedłużenie osi optycznej rury, zawierającej objektyw i jeżeli osie te, będąc przedłużone, spotykają środek siatki w *A'* i *A''*, to obserwator widzi w *C'*, również jak i w *C''*, utworzony

przez objektywy *B'* i *B''* rzeczywisty obraz siatki, znajdującej się po za tym objektywem, który to obraz zlewa się z siatką w okularze. Na odwrót także z podobnego widoku można sądzić, że osie optyczne stanowią jedną prostą linię, która będąc przedłużona spotka środek siatki w *A'* i *A''* czyli, że wtedy *C' C''* jest równe *B' B''* i równe *A' A''*. Najmniejsze wydłużenie sztaby środkowej narusza tę koincydencyę, albowiem wtedy objektyw ulega przesunięciu.

Z początku doprowadza się temperaturę trzech wanien do 0°, następnie reguluje się długość sztaby środkowej za pomocą specyalnych części, przedstawionych oddzielnie na figurze 406.

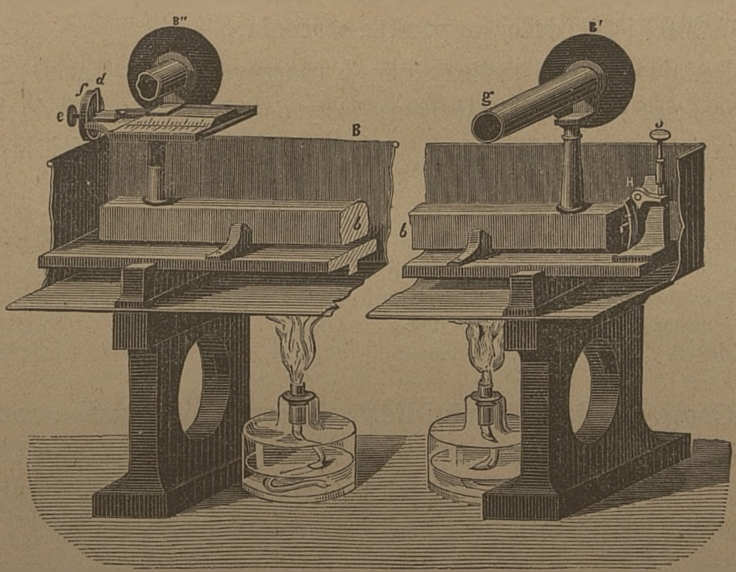


Fig. 406. Oddzielne szczegóły przyrządu Ramsdena.

Mianowicie jeden koniec sztaby od strony *B'* przylega do dźwigni, którą przesuwa się za pomocą szruby *J* i która służy do utrzymywania końca tego w niezmiennem położeniu. Na drugim końcu przy *B''* znajduje się tak zwana szruba mikrometryczna, pozwalająca przesuwać rurę z objektywem wzdłuż sztaby i oceniająca wielkość tego przesunięcia do $1/_{500}$ milimetra. Gdy następnie ogrzewa się wannę środkową, objektyw *B''* oddala się wsku-

tek rozszerzenia sztaby; sprowadza się go napowrót aż do koincydencyi za pomocą szruby mikrometrycznej, liczba zaś obrotów, jaką przy tem szruba robi, pozwala z wielką dokładnością obliczyć wydłużenie sztaby, z którego łatwo już oznaczyć spółczynnik jej rozszerzalności.

Nad rozszerzalnością ciał pracowali jeszcze De Luc, Borda, Dulong i Petit oraz wielu innych. Z prac ostatnich dwóch uczonych wynika bardzo ważny rezultat a mianowicie, że rozszerzalność ciał stałych przy wysokich temperaturach nie jest już proporcyonalną do temperatury, mierzonej za pomocą rtęciowego termometru, lecz wzrasta w miarę jej podwyższania; spółczynnik powiększa się pomiędzy 100° i 200°, wzrasta jeszcze pomiędzy 200° i 300° i tak dalej do punktu wrzenia.

Podajemy tutaj spółczynnik *k* rozszerzalności linijnej niektórych ciał stałych, znaleziony przy ogrzewaniu od 0° do 100° i wyrażony jako ułamkowa część pierwotnej długości danego ciała: [1])

Flintglas	0,00081166	Złoto	0,00146606
Szkło w rurkach bez ołowiu	0,00089694	Miedź	0,00171733
Stal niehartowana	0,00107915	Srebro	0,00190974
Stal hartowana	0,00123956	Ołów	0,00284836
Żelazo miękkie	0,00122045	Platyna	0,00085655

Chcąc z podanych tutaj liczb obliczyć spółczynnik α rozszerzalności linijnej przy ogrzaniu od 0° do 1°, należy je podzielić przez 100; mnożąc zaś przez 3 otrzymamy spółczynnik rozszerzalności sześciennej.

Nie wszyscy badacze znaleźli dla niektórych substancyj ten sam spółczynnik rozszerzalności, owszem dane ich dla wielu ciał różnią się niemało tak, że każda liczba stosuje się właściwie tylko do tego kawałka, który podlegał doświadczeniu. I tak Regnault znalazł, że spółczynnik rozszerzalności szkła jest różny dla rozmaitych gatunków i zmienia się nawet wraz z kształtem nadanym tej substancyi. Zależy to szczególniej od układu czą-

---

[1]). Podług Lavoisier'a i Laplace'a.

stek w ciele, tak np. żelazo rozszerza się w stopniu nader rozmaitym zależnie od tego, czy jest lanem, kutem lub też wyciągniętem w druty. Jeżeli ciała stałe posiadają w rozmaitych kierunkach różną budowę, to nie wszędzie jednakowo się rozszerzają tak np. suche drzewo ma w kierunku włókien inny spółczynnik rozszerzalności, aniżeli w kierunku prostopadłym do nich. Również w kryształach podwójnie załamujących światło, rozszerzalność w kierunku osi optycznej jest inna, aniżeli w kierunku do niej prostopadłym. Mitscherlich i Fizeau pokazali, że w jednym lub w drugim kierunku może nawet mieć miejsce kurczenie się, jakkolwiek ogólna objętość przytem się powiększa. Podczas gdy spółczynnik rozszerzalności spatu wapiennego wynosi w kierunku osi optycznej 29 milionowych, to w kierunku do niej prostopadłym kryształ się kurczy. Podobne obserwacye zrobiono także nad szmaragdem, ortoklasem i innemi kryształami. Różnice w budowie zależnie od kierunku wewnątrz kryształu, ujawniające się przez rozmaity sposób załamywania światła, występują tedy i przy działaniu ciepła. Czytelnik rozumie obecnie dlaczego przy obliczaniu spółczynnika rozszerzalności sześciennej ze spółczynnika rozszerzalności linijnej, przyjmowaliśmy, iż budowa ciała jest wszędzie jednakową. Tylko wtedy bowiem rozszerzalność jest we wszystkich kierunkach jednakowa i nie zachodzi zmiana kształtu tak, że np. sześcian pozostaje sześcianem. Stosuje się to do ciał niekrystalicznych, a z kryształów jedynie do tych, które należą do prawidłowego systemu.

Wspomniane wyżej zboczenia nie stanowią wcale wyjątków z ogólnego prawidła, że ciała rozszerzają się pod wpływem ciepła, jeżeli bowiem w pewnych kierunkach kurczą się, to jednak cała objętość się powiększa. Tymczasem takie ciała, jak kauczuk, jodek ołowiu, podwójny jodek ołowiu i srebra, jodek srebra aż do 156°, 5 C., granaty i woda pomiędzy 0° i 3°, 9 kurczą się przy ogrzewaniu; powiadamy, że ciała te mają odjemny spółczynnik rozszerzalności.

Drzewa, również jak i większość substancyj organicznych, zmniejszają swą objętość przy ogrzewaniu, jeżeli przedtem nie były doskonale osuszone; oziębione zaś do pierwotnej temperatu-

ry, nie powracają wcale do dawnej objętości. Gdybyśmy je zważyli przed i po ogrzaniu, przekonalibyśmy się, że waga ich się zmniejszyła, a to dlatego, że pod działaniem ciepła wydzielają się z nich pewne materye, jak np. woda, zawarta pomiędzy ich cząstkami. To objaśnia nam zmniejszanie się ich objętości. Podobnemu kurczeniu ulega także glina, a zjawisko to trwa jeszcze i wtedy, gdy cała ilość swobodnej wody została z gliny wydalona; prawdopodobnie składniki gliny wchodzą w jakiś silniejszy związek, albowiem po ogrzaniu posiada ona zupełnie inne własności, których nie traci po oziębieniu, podobnie jak nie powraca wtedy do pierwotnej objętości.

Obecnie pokażemy na kilku przykładach jaki pożytek osiągamy z dokładnej znajomości wpływu ciepła na ciała stałe.

Gdy łatwo łamliwe ciało, w którem ciepło powoli się rozchodzi, poddajemy nagłej zmianie temperatury, wtedy ono zwykle pęka; wiadomo wszak, że zimne szkło, zetknięte z gorącym przedmiotem albo też na odwrót, szkło gorące zetknięte z ciałem zimnem, ulegają pęknięciu. W pierwszym wypadku części szkła, stykające się z ciałem gorącem, nagle się rozszerzają, podczas gdy sąsiednie części nie zdążyły jeszcze ogrzać się, wskutek czego następuje ich rozdział; w drugim zaś wypadku pęknięcie jest rezultatem nagłego skurczenia się najbliższych części. W podobny sposób pękają zimne naczynia, gdy wlewamy do nich gorącą ciecz, albo też naczynia gorące, gdy wlewamy do nich ciecz zimną. Rozszerzanie się metali, użytych do budowli podczas gorącej pory roku i kurczenie się ich w czasie zimna, powodują niekiedy zjawiska tem bardziej uderzające, im większą jest różnica pomiędzy rozszerzalnością metali i rozszerzalnością materyałów, z któremi są zetknięte. Ołów pokrywający dachy rozszerza się dniem i kurczy nocą; ponieważ siła ciężkości ułatwia pierwsze, a przeszkadza drugiemu, to ostatecznym wynikiem jest opuszczanie się ołowiu ku dołowi. Tyndal w swojem dziele o cieple przytacza podobny wypadek, jaki zdarzył się w Bristolu: ołowiany dach katedry zesunął się w ciągu dwóch lat na 18″, siła zaś, dzięki której to się odbywało, była tak wielka, że gwoździe wbite w szpary dachu, w celu przytrzymania go, zostały

wyrwane. Z przykładu tego widać jak ważnem jest branie w rachubę rozszerzalności ciał stałych przy stawianiu budowli i w ogóle w przemyśle. Szyny na drogach żelaznych nie są układane szczelnie, należy im bowiem dać możność roszerzania się latem i kurczenia zimą. Obręcz na koła nasadza się wtedy, gdy ona jest rozgrzaną; przy oziębieniu kurczy się i ściska oddzielne części koła w jedną całość.

Niejednakowa rozszerzalność metali znalazła bardzo ważne zastosowanie w *wahadle kompensacyjnem*, mającem stałą długość bez względu na temperaturę.

Gdyby wahadło było zwyczajną sztabą metalową, wahałoby się nieprawidłowo, to jest prędzej zimą, aniżeli latem i nie mogłoby służyć jako regulator przy zegarze. W wahadle kompensacyjnem soczewka L (fig. 407) jest zawieszona na ramce, zbudowanej ze sztabek żelaznych (na rysunku ciemne) i mosiężnych (na rysunku jasne). Sztabka i jest u góry przymocowana do poprzecznej beleczki, dolny zaś jej koniec przechodzi swobodnie przez walcowate otwory w dolnych poprzecznych beleczkach. Sztabki żelazne i mosiężne są ułożone w taki sposób, że pierwsze mogą rozszerzać się jedynie z góry na dół, drugie zaś przeciwnie tylko z dołu ku górze; rozszerzanie się tedy sztabek żelaznych obniża soczewkę, rozszerzanie się mosiężnych podnosi ją ku górze. Urządziwszy odpowiednio całą ramkę, można oba te działania wzajemnie zrównoważyć.

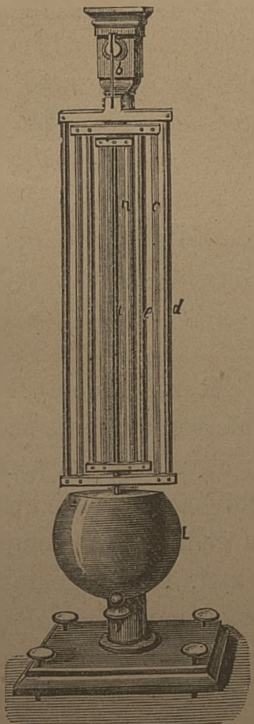


Fig. 407. Wahdło kompensacyjne.

Można także skompensować wahadło za pomocą osadzonej na niem poprzecznej beleczki (fig. 408), a składającej się ze sztabek miedzianej i żelaznej razem połączonych. Sztabka

miedziana, bardziej rozszerzalna i bardziej kurczliwa, znajduje się poniżej żelaznej.

Gdy temperatura się obniża i pręt wahadła staje się krótszy a soczewka podnosi się ku górze, wtedy beleczka poprzeczna ulega takiemu zgięciu (*b*), że dwie kulki metalowe, osadzone na jej końcach opuszczają się i — jeżeli masa ich jest odpowiednio dobraną — obniżają środek ciężkości całego wahadła. Gdy temperatura wzrasta, beleczka wygina się w taki sposób (*c*), że kulki metalowe wznoszą się do góry, a środek ciężkości całego wahadła zostaje podniesiony.

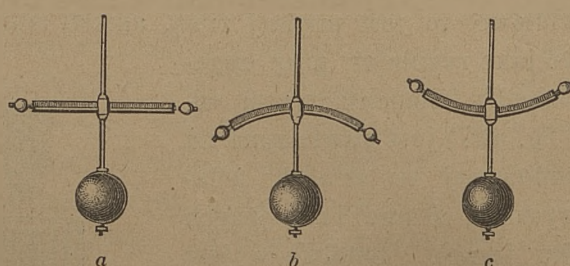


Fig. 408. Beleczka kompensacyjna, osadzona na wahadle.

§ 4. Rozszerzalność cieczy.

Rozszerzenie linijne cieczy nie może mieć miejsca, lecz jedynie rozszerzenie sześcienne. Nawet wydłużanie się słupa cieczy określamy za pomocą spółczynnika sześciennego. Ponieważ dalej ciecze są zawsze zawarte w naczyniach, przeto nie można podnieść ich temperatury, nie ogrzawszy jednocześnie tych naczyń, rozszerzenie których maskuje, że tak powiemy, istotne powiększanie się objętości cieczy. Dlatego też należy odróżnić *pozorne* albo względne rozszerzanie się cieczy w rozszerzającem się naczyniu i rozszerzenie istotne czyli *absolutne*, niezależne od naczynia. Doświadczenie, opisane przez nas (str. 643) w pierwszym § niniejszego rozdziału, może nam pokazać, jaki jest wpływ rozszerzalności naczynia na objętość znajdującej się w niem cieczy; w pierwszej chwili po ogrzaniu przyrządu ciecz w rurce opada,

Дозволено Цензурою, Варшава 21 Апрѣля 1889 г.

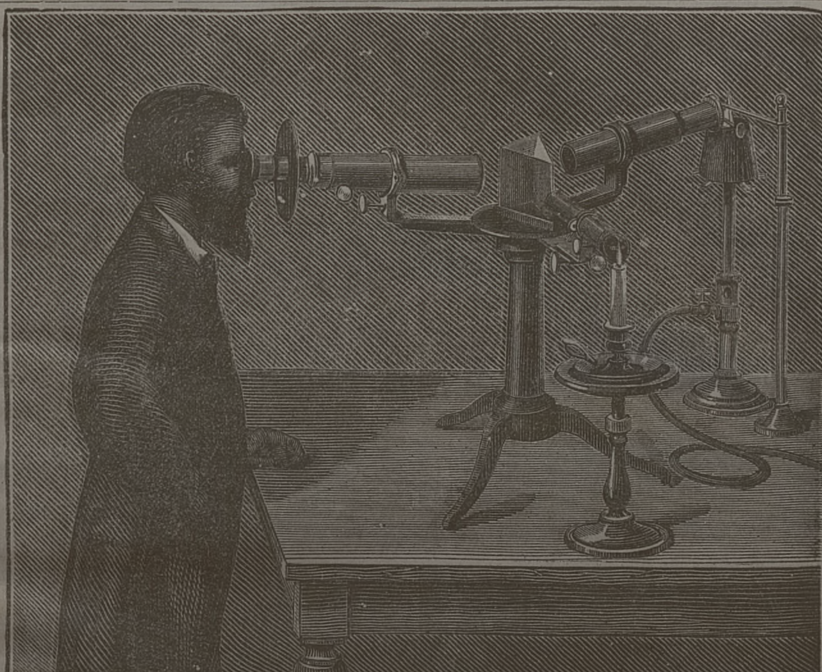
Druk Jana Cotty w Warszawie, Senatorska 29.

Cena 20 kop. **Zeszyt 22.** Cena 20 kop.

SIŁY PRZYRODY.

POPULARNY WYKŁAD FIZYKI

I GŁÓWNIEJSZYCH JEJ ZASTOSOWAŃ.



Spektroskop.

Podług dzieła A. Guillemin'a „Le monde physique"

OPRACOWALI

[Rozalia] **Józefowa Nusbaum**

bak. n. prz.

i

Henryk Silberstein

dr. fil., b. as. chem. przy un. w Bernie.

WARSZAWA.

Nakładem Księgarni **H. Olawskiego**, ul. Mazowiecka № 6.

1889.

co zależy od tego, że balon ogrzawszy się wcześniej, aniżeli ciecz, ulega rozszerzeniu, czyli objętość jego się powiększa, a ciecz pozornie się kurczy. Lecz wkrótce ciepło udziela się cieczy, a ponieważ ona rozszerza się bardziej, aniżeli szkło, poziom w rurce szybko się podnosi. Ażeby czytelnik lepiej zrozumiał, co pojmujemy pod pozorną rozszerzalnością cieczy, wyobraźmy sobie naczynie, podzielone na części o jednakowej objętości i przypuśćmy, że przy temperaturze 0^0 zawarta w niem ciecz zajmuje takich części np. 64, przy temperaturze zaś 100^0 części 65. Objętość tedy cieczy równa 64 powiększyła się przy ogrzaniu na sto stopni o 1, jednostka zaś objętości powiększyła się o $^1/_{64}$ część. Ten ułamek wyraża rozszerzalność cieczy i znaleziony jak widzimy bez uwzględnienia rozszerzalności samego naczynia, stanowi *spółczynnik pozornej jej rozszerzalności*. Oczywiście, że rozszerzalność absolutna jest większa od pozornej, o rozszerzalność naczynia; rachunek też pokazuje, że *spółczynnik Δ absolutnej rozszerzalności cieczy jest równy jej spółczynnikowi α rozszerzalności pozornej więcej spółczynnik K rozszerzalności samego naczynia* czyli, że $\Delta = \alpha + K$.

Przy badaniu rozszerzalności cieczy możemy się posługiwać dwiema metodami. Podług jednej obserwujemy pozorną zmianę objętości cieczy w naczyniach, których spółczynnik rozszerzalności jest znany i następnie obliczamy z tych dwóch danych rozszerzalność cieczy, druga zaś metoda pozwala nam określić tę rozszerzalność niezależnie od rozszerzalności naczynia. Obydwie te metody zostały zastosowane do oznaczenia rozszerzalności rtęci.

Przy posługiwaniu się pierwszą z nich, obserwuje się rozszerzenie rtęci w przyrządzie, zbudowanym podobnie jak termometr. Włoskowata rurka tego przyrządu jest podzielona na części, przyczem wzajemny stosunek oddzielnych objętości, zawartych pomiędzy dwiema podziałkami, jest dokładnie wiadomy, również jak i stosunek takiej objętości do objętości zbiornika termometru.

Lavoisier i Laplace badali poziom rtęci w takim przyrządzie, doprowadzanym przez nich stopniowo do temperatury 0^0,

t^0, t'^0 i z tego z łatwością obliczali pozorną rozszerzalność jednostki objętości cieczy od 0^0 do rozmaitych punktów skali termometrycznej. Z drugiej strony uczeni ci oznaczyli, za pomocą swojej metody, spółczynnik rozszerzalności linijnej sztaby, zrobionej ze szkła tego samego gatunku, co szkło owego przyrządu, użytego do badań, mnożąc zaś znalezioną liczbę przez trzy, otrzymywali spółczynnik rozszerzalności sześciennej tegoż szkła. Otóż potrzeba było tylko do pozornej rozszerzalności rtęci, poprzednio zaobserwowanej, dodać rozszerzalność sześcienną szkła termometru, ażeby otrzymać absolutną rozszerzalność rtęci.

W taki sposób Lavoisier i Laplace znaleźli, że jednostka objętości rtęci, ogrzana od 0^0 do 100^0, rozszerza się o $^1/_{55,21}$ czyli, że spółczynnik absolutnej rozszerzalności tej cieczy, ogrzanej na 1^0, jest równy $^1/_{5521}$ albo 0,0001786.

Metodzie tej, którą posługiwali się także Cavendish, Haelstroem i inni, można zrobić pewien zarzut. Widzieliśmy mianowicie wyżej, że, jak to wynika z doświadczeń Regnault'a, nietylko rozmaite gatunki szkła rozszerzają się niejednakowo, lecz że nawet kształt nadany tej substancyi wpływa na jej rozszerzalność. Chcąc tedy za pomocą tej metody otrzymać zupełnie dokładny rezultat, nie dosyć jest obliczyć rozszerzalność sześcienną naczynia, zawierającego badaną rtęć, z rozszerzalności linijnej szkła tego samego gatunku, lecz należy określić bezpośrednio rozszerzalność samego naczynia.

Druga metoda oznaczania rozszerzalności cieczy jest bezpośrednia, albowiem pozwala ją mierzyć niezależnie od rozszerzalności innego ciała. Opiera się ona na prawie hydrostatycznem, że w naczyniach połączonych dwa słupy cieczy równoważą się wzajemnie, jeżeli ich wysokości są odwrotnie proporcyonalne do ich ciężarów właściwych (patrz str. 94). Z drugiej zaś strony gdy objętość ciała się zmienia, lecz waga jego pozostaje tą samą, wtedy jego ciężar właściwy zmienia się w stosunku odwrotnym do objętości. Wreszcie wiemy, że objętość zajmowana przez ciało zależy od temperatury i od jego *spółczynnika rozszerzalności*. Rzecz oczywista tedy, że stosunek ciężarów właściwych cieczy, równy odwrotnemu stosunkowi objętości przy dwóch różnych temperatu-

rach, można przedstawić także jako stosunek dwóch wartości, wyrażających te objętości i w które wchodzi wielkość Δ to jest spółczynnik absolutnej rozszerzalności tejże cieczy. Taką jest zasada metody Dulong'a i Petit'a oznaczania rozszerzalności rtęci, do której to metody nie jest potrzebna znajomość rozszerzalności szkła. Rtęć wprowadza się do dwóch szklanych naczyń połączonych, niezbyt wązkich; jedno z nich znajduje się niezmiennie przy temperaturze 0^0, drugie doprowadza się do temperatury t^0, przyczem przedsięwzięte są wszelkie środki ostrożności, ażeby dwa te słupy cieczy niejednakowo ogrzane nie mięszały się ze sobą. Wysokości takich słupów są odwrotnie proporcyonalne do ich ciężarów właściwych i zmierzywszy je można już było z łatwością obliczyć absolutną rozszerzalność rtęci. Zmiana objętości naczyń nie wpływała wcale na stosunek tych wysokości.

Oto opis przyrządu, użytego przez Dulong'a i Petit'a. Na stoliku z drzewa massywnego znajduje się sztaba żelazna, mająca kształt litery T i zaopatrzona w dwie libelle, pozwalające sprowadzić do poziomego położenia tę część sztaby, która podtrzymuje dwa szklane naczynia *A* i *B*, połączone za pomocą bardzo wązkiej rurki (fig. 409 str. 676). Małe przecięcie tej ostatniej przeszkadza mięszaniu się dwóch słupów rtęci, niejednakowo ogrzanych, lecz niemniej przeto komunikują one ze sobą. Same zaś naczynia *A* i *B* są w górnej części dość szerokie, a to w celu uniknięcia wpływu włoskowatości na wysokość rtęci. Naczynie *A* całkowicie otoczone jest tłuczonym lodem, zawartym w metalowym rękawie *M*, w górnej części którego znajduje się wyżłobienie, pozwalające w danej chwili usunąć nieco lodu i odsłonić poziom rtęci w tem naczyniu.

Podobny rękaw metalowy *M'* otacza także naczynie *B*; jest on napełniony oliwą, temperatura której może być doprowadzona do 250^0 i 300^0. Ogrzewa ją ognisko otaczające rękaw *M'*, temperaturę zaś jej mierzy się za pomocą termometru powietrznego i drugiego zwanego wagowym w znacznej swej części zanurzonych w oliwie.

Doświadczenie rozpoczyna się od ogrzania oliwy do żądanej temperatury t^0 przy której — za zachowaniem pewnych środków ostrożności — utrzymuje się ona przez pewien przeciąg czasu.

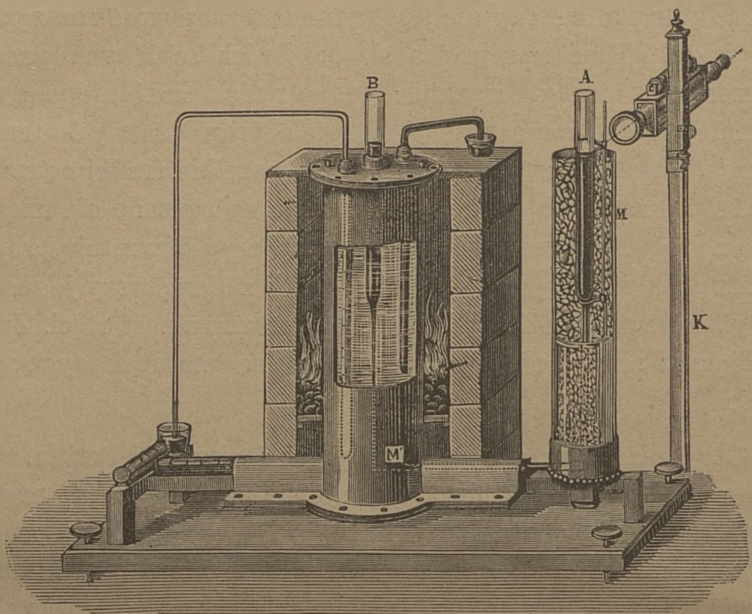


Fig. 409. Przyrząd Dulong'a i Petit'a.

Należy koniecznie starać się o to, ażeby podczas ogrzewania rtęć w naczyniu *B* nie podnosiła się powyżej pokrywki zamykającej rękaw *M'*. Dopiero przed samem mierzeniem dolewa się do naczynia B nieco ogrzanej poprzednio rtęci tak, ażeby menisk jej wystawał ponad pokrywkę. Dulong i Petit dokonywali mierzeń za pomocą umyślnie w tym celu zbudowanego katetometru *K*, pozwalającego bezpośrednio odczytywać 0,05 milimetra. Lunetę katetometru (jak wiemy w zasadzie jest to pionowy słup na którym oznaczone są podziałki i wzdłuż którego przesuwa się luneta) skierowywano najprzód na wierzchołek gorącego słupa rtęci, następnie na wierzchołek słupa zimnego, a różnica w położeniu lunety dawała *różnicę* pomiędzy wysokością h_t pierwszego i wysokością h_o drugiego. Następnie skierowywano lunetę na oś wązkiej rurki, łączącej oba naczynia A i B częściowo obnażonej

i otrzymywano w ten sposób wysokość h_0 zimnego słupa rtęci. Powtarzamy, że mając te dane, można już było łatwo obliczyć wartość spółczynnika absolutnej rozszerzalności rtęci.

Dulong i Petit znaleźli, że spółczynnik ten obliczony dla 1° jest równy $^1/_{5550}$ przy temperaturze 100°; przy 200° równy $^1/_{5425}$; przy 300° równy $^1/_{5300}$. Rozszerzalność tę dla 1° obliczali w taki sposób, że przyrost objętości zaobserwowany przy 100° dzielili przez 100, przy 200° przez 200, przy 300° przez 300.

Przytoczone liczby ułamkowe są, jak widzimy, coraz większe, w miarę doprowadzania do coraz wyższej temperatury, z czego wynika, że rozszerzalność rtęci nie jest proporcyonalna do temperatury, mierzonej za pomocą termometru powietrznego, lecz że wzrasta szybcej, aniżeli ta temperatura, podobnie jak rozszerzalność ciał stałych wzrasta prędzej od temperatury, mierzonej za pomocą termometru rtęciowego.

Należy jeszcze wspomnieć, że najpewniejszą metodą oznaczania rozszerzalności sześciennej naczynia jest obliczenie jej z zaobserwowanej pozornej rozszerzalności danej cieczy, zawartej w tem naczyniu oraz ze znanej absolutnej rozszerzalności tejże cieczy. Przy pomocy znanej rozszerzalności rtęci Dulong i Petit oznaczyli spółczynnik rozszerzalności szkła i dowiedli, że ta ostatnia wzrasta szybcej, aniżeli temperatura. W podobny sposób Dulong i Petit oznaczyli rozszerzalność żelaza, miedzi i platyny, Dulong zaś i Mitscherlich — rozszerzalność sześcienną spatu wapiennego.

Badaniem absolutnej rozszerzalności innych cieczy zajmowali się Deluc, Gay-Lussac, Biot, Despretz oraz Pierre. Metoda przez nich stosowana polega na tem, że z badaną cieczą urządza się termometr, zupełnie podobny do zwykłego i porównywa jego wskazówki ze wskazówkami dobrego rtęciowego termometru, znajdującego się w tych samych warunkach. Jeżeli dwa te porównywane ze sobą termometry posiadają rurki i zbiorniki jednakowych rozmiarów i jeżeli obadwa są kompletnie zanurzone w jednej i tej samej kąpieli, to absolutna rozszerzalność cieczy od 0° do rozmaitych innych temperatur z łatwością daje się wtedy obliczyć. Prosty bowiem rachunek pokazuje, że spół-

czynnik absolutnej rozszerzalności cieczy przy ogrzaniu na t^0 wyraża się wtedy formułą, w którą wchodzą objętość cieczy przy 0^0 oraz przy t^0, spółczynnik rozszerzalności szkła i temperatura, a więc wartości, mogące bezpośrednio być zaobserwowane.

Badanie absolutnej rozszerzalności innych jeszcze cieczy, oprócz rtęci, doprowadziło do wniosku, że rozszerzalność ta jeszcze bardziej odstępuje od prawa prostej proporcyonalności do temperatury, aniżeli rozszerzalność rtęci. Gdy porównamy ze sobą różne ciecze pod względem ich rozszerzalności, zobaczymy, że dla każdej z nich czynniki formuły empirycznej, pozwalającej obliczyć rozszerzenie jednostki objętości ogrzanej od 0^0 do t^0, są inne.

Ciekawą jest rozszerzalność cieczy, które wrą przy niskiej temperaturze. I tak Thilorier w roku 1835 mówił o wielkiej rozszerzalności ciekłego kwasu węglanego przy przejściu jego od temperatury 0^0 do 30^0; oceniał ją jako cztery razy większą od rozszerzalności powietrza, znajdującego się w takich samych warunkach. Fakt ten podawany był w wątpliwość przez niektórych fizyków, lecz nowsze doświadczenia nie pozostawiają żadnej co do niego wątpliwości. Dowodzą one, że dla cieczy bardzo lotnych, spółczynnik rozszerzalności może znacznie przewyższyć takiż spółczynnik dla powietrza i innych gazów. Naprzykład dla kwasu siarkawego spółczynnik rozszerzalności przy 80^0 jest równy spółczynnikowi dla powietrza, zaś przy 130^0 jest od niego trzy razy większy [1]).

Prawo rozszerzalności wody różni się bardzo od praw rozszerzalności innych cieczy. Woda przedstawia tę ciekawą właściwość, że objętość jej, począwszy od temperatury 0^0 *zmniejsza się* w miarę podwyższania temperatury do 4^0 blizko.

Powyżej tej ostatniej objętość znów się powiększa tak, że przy 8^0 woda posiada tę samę objętość co przy 0^0. Wynika z tego, że przy 4^0 dana ilość wody zajmuje *najmniejszą* objętość, ponieważ zaś, jak widzieliśmy wyżej, ciężar właściwy czyli gęstość ciała przy niezmiennej jego wadze jest w stosunku od-

---

[1]) *Boutan* et *d'Almeida* Cours élémentaire de Physique.

wrotnym do objętości, to woda przy 4^0 przedstawia także *największą* gęstość.

Następujące doświadczenie Hope'a dowodzi, że istotnie woda przy 4^0 posiada maximum gęstości. Szklane naczynie (fig. 410) otoczone jest w górnej swej części rękawem, napełnionym lodem tłuczonym albo też mieszaniną oziębiającą. Przez otwory w ścianie jego przechodzą dwa termometry umieszczone poziomo tak, że kulki ich wypadają na osi naczynia. Napełnijmy to ostatnie wodą przy temperaturze pokojowej i pozostawmy je samemu sobie, a zobaczymy, że dolny termometr będzie wskazywał dość szybkie obniżanie się temperatury, podczas gdy temperatura górnego będzie spadała nader nieznacznie.

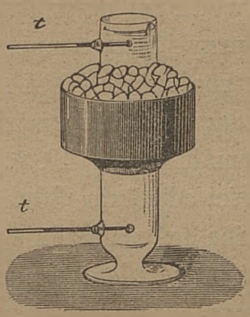


Fig. 410. Naczynie służące do pokazania, że woda przy 4^0 ma największą gęstość.

Wkrótce pierwszy z nich osiągnie *stałą* temperaturę blizką 4^0, drugi będzie wskazywał dalej stopniowo obniżającą się temperaturę, która spadnie do 0^0, a nawet niżej. Zjawisko to tłomaczy się w sposób następujący. Woda w naczyniu oziębia się wskutek zetknięcia ścian jego z lodem, jako cięższa opada ku dołowi i obniża termometr dolny; odbywa się to tak długo, dopóki dolne warstwy nie osiągną temperatury 4^0. Od tej chwili ciągłe obniżanie się temperatury górnego termometru wskazuje, że woda przestaje opadać ku dołowi. Wynika z tego, że woda przy 4^0, która pozostaje w dolnej części naczynia, posiada gęstość większą od gęstości przy każdej innej temperaturze.

Opisane doświadczenie nie pozwala jednak w sposób dostatecznie ścisły ocenić temperatury, przy której gęstość wody osiąga swoje maximum. Lecz dokładna znajomość tej temperatury jest bardzo ważna, albowiem, jak wiemy, za jednostkę wagi (gram) przyjęto wagę jednego sześciennego centymetra wody dy-

stylowanej przy temperaturze największej jej gęstości. Lefèvre-Gineau, zobowiązawszy się dać wzorzec kilograma, gdy przyjęto nowy system miar, ważył jeden i ten sam sześcian metalowy w czystej wodzie, kolejno ogrzewanej do różnych temperatur. Oczywiście że w chwili gdy ciśnienie wody z dołu do góry jest największe, to jest gdy sześcian traci najwięcej na wadze, woda ma największą gęstość, należy więc tylko zaobserwować przy jakiej temperaturze to ma miejsce. W taki sposób Gineau znalazł liczbę 4°, 4. Haelstroem posługiwał się podobną metodą; ważąc w wodzie kulkę szklaną odpowiednio obciążoną, otrzymał liczbę 4°, 1. Ułożył on tablicę objętości wody i jej gęstości od 0° do 30°. Wreszcie Despretz, który wykonywał odnośne doświadczenia w warunkach bardziej sprzyjających dokładnym rezultatom, aniżeli warunki doświadczeń Gineau i Haelstroema, otrzymał liczbę 3°,997 a więc nader blizką 4°. Oprócz tego Despretz zbadał dokładnie roztwory solne i alkohol zawierający wodę. I dla tych także cieczy, głównym składnikiem których jest woda, znalazł on maximum gęstości, lecz przy niższej temperaturze i to tem niższej im większa jest ilość obcej substancyi, dodanej do wody. Naprzykład roztwór 7,4 części wagowych alkoholu w 100 cz. wody przedstawia maximum gęstości przy temperaturze 2°,3. Roztwór 1,25 części soli kuchennej w 100 cz. wody ma największą gęstość przy 1°,2, a więc przy temperaturze niższej o 2°,8 aniżeli dla czystej wody; rozpuściwszy zaś dwa razy większą ilość soli w tej samej ilości wody, obniżamy przez to temperaturę największej gęstości roztworu do 1°,7 poniżej zera. [1])

§ 5. Rozszerzalność i gęstość gazów.

Rozszerzalność gazów, a szczególniej powietrza atmosferycznego, była badaną przez bardzo wielu fizyków, dawniejsze jednak odnośne doświadczenia nie wzbudzały wielkiego zaufa-

---

[1]) Wüllner, l. c.

nia dlatego, że nie zwracano przy nich dosyć uwagi na to, ażeby badane gazy były zupełnie suche. Liczby najbardziej zgodne z nowszemi wynikami otrzymali Lambert, De Luc i Mayer. Pierwsi znaleźli, że suche powietrze ogrzane od 0^0 do temperatury wrzenia wody, rozszerza się o 0,375 respective 0,372 pierwotnej objętości, zajmowanej przy 0^0; Mayer zaś znalazł raz liczbę 0,3755, drugi raz 0,3656.

Pierwszym, który starał się badać rozszerzalność powietrza w stanie zupełnie suchym, był Gay-Lussac. Metoda jego podobną jest do tej, jaką opisaliśmy przy rozszerzalności cieczy, obserwował on mianowicie pozorne rozszerzenie powietrza w rurce termometrycznej i z tego, jakoteż ze znanego spółczynnika rozszerzalności szkła, obliczał absolutną rozszerzalność powietrza.

Figura 411 przedstawia przyrząd, jakim Gay-Lussac posługiwał się w swoich doświadczeniach. Widzimy tutaj kulkę

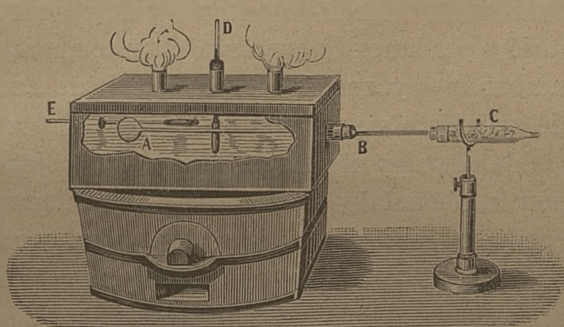


Fig. 411. Przyrząd Gay-Lussac'a.

szklaną, zaopatrzoną w takąż długą rurkę *AB*. podzieloną na części, stosunek objętości takiej części do objętości kulki ściśle był określony. Chcąc wprowadzić do rurki suche powietrze, Gay-Lussac napełnił ją z początku rtęcią, którą gotował w celu wypędzenia wilgoci, następnie połączył jej koniec z szerszą rurką *C*, zawierającą chlorek wapnia — substancyę silnie pochłaniającą wodę. Oprócz tego wprowadził do rurki *AB* cienki drut platynowy, którego koniec wystawał z ruki C. Przy lekkiem potrząsaniu tym drutem, kropelki rtęci wypływały, ich zaś miej-

sce zajmowały pęcherzyki powietrza, które przeszły przez rurkę C i tutaj uległy osuszeniu. Gdy już kulka i rurka napełnione były suchem powietrzem, wyciągano ów drut platynowy, przyczem starano się, ażeby w rurce pozostała pewna ilość rtęci, mająca służyć jako wskaźnik.

Tak przygotowaną rurkę umieszczano poziomo w naczyniu, które z początku napełniano topniejącym lodem. Temperaturę mierzono za pomocą dwóch rtęciowych termometrów E i D. Gdy rurka osiągała temperaturę 0^0, obserwowano położenie rtęciowego wskaźnika i określano tym sposobem objętość, jaką przy temperaturze topniejącego lodu oraz przy danem ciśnieniu atmosferycznem zajmowało powietrze, zamknięte w rurce. Niechaj objętość ta będzie równa V_o. Następnie przyrząd napełniano wodą i ogrzewano, starając się przytem, ażeby temperatura jej była wszędzie jednakowa. Rozszerzające się w rurce powietrze pchało przed sobą kroplę rtęci, dopóki ciśnienie jego nie stało się równem ciśnieniu zewnętrznego powietrza; położenie kropli wskazywało objętość V_t badanego powietrza przy temperaturze t i danem ciśnieniu barometrycznem. Gdyby ciśnienie zewnętrznego powietrza nie zmieniało się w ciągu całego doświadczenia i gdyby objętość szkła również nie uległa zmianie, to objętość V_t badanego powietrza równałaby się jego objętości V_o przy temperaturze 0^0 więcej przyrost objętości pod wpływem ogrzania na t^0 czyli, że $V_t = V_o (1 + k_t)$, gdzie k_t oznacza spółczynnik rozszerzalności powietrza. Ponieważ jednak objętość szkła także się powiększyła, to do przytoczonej formuły wprowadzono jeszcze znany spółczynnik rozszerzalności sześciennej szkła i wtedy dopiero obliczano z niej wartość spółczynnika k_t. Jeżeli w ciągu doświadczenia ciśnienie barometryczne ulegało zmianie, brano ją również pod uwagę, albowiem objętość V_t redukowano za pomocą rachunku do ciśnienia, przy którem oznaczano objętość V_o.

Za pomocą wielu doświadczeń Gay-Lussac znalazł, że spółczynnik rozszerzalności suchego powietrza przy ogrzaniu od 0^0 do 100^0 jest równy 0,375. Uczony ten badał rozszerzalność innych jeszcze gazów i doszedł do wniosku, że *wszystkie gazy, ogrzane od 0^0 do 100^0 rozrzerzają się jednakowo, to jest że objętość ich powiększa się o 0,375 pierwotnej objętości.*

Zdanie Gay-Lussac'a, że wszystkie gazy rozszerzają się jednakowo, również jak i wartość spółczynnika tej rozszerzalności, zostały z początku powszechnie uznane za prawdziwe, tembardziej, że wartość tę pośrednio potwierdziły poszukiwania Dulong'a i Petit'a. Następnie jednak zaczęto podawać ją w wątpliwość. Rudberg pierwszy rozpoczął na nowo badania nad rozszerzalnością suchego powietrza, posługując się przytem metodą, różną od metody Gay-Lussac'a i znalazł, że powyższy spółczynnik (0,375) jest za wielki, podług niego bowiem wynosi on tylko 0,365. Jednocześnie także inni uczeni, jak Magnus i Regnault przedsięwzięli badanie spółczynników rozszerzalności gazów i znaleźli liczbę 0,3665.

W doświadczeniu Gay-Lussac'a istniały dwie przyczyny pomyłek, a mianowicie gaz nie był zupełnie suchy i wskaźnik rtęciowy, przesuwający się w rurce termometrycznej, nie zamykał jej hermetycznie tak, że zewnętrzne powietrze mogło przenikać do wnętrza rurki. Metody Regnault'a są wolne od tych braków. Znakomity ten fizyk posługiwał się kolejno rozmaitemi sposobami do oznaczenia rozszerzalności gazów; raz badał je przy zmiennem ciśnieniu i zmiennej objętości, drugi raz przy stałem ciśnieniu i zmiennej objętości albo też naodwrót przy stałej objętości i zmiennem ciśnieniu. Regnault zastosował metodę swą do innych jeszcze gazów, oprócz powietrza atmosferycznego i doszedł do bardzo ciekawych rezultatów. Okazało się mianowicie, że spółczynniki rozszerzalności rozmaitych gazów różnią się nader znacznie pomiędzy sobą oraz, że wartość tych spółczynników zależy od sposobu ich określania. Gdy określamy spółczynnik przez bezpośrednią obserwacyę zmian objętości, jakim ulega dana masa gazu o stałem ciśnieniu, otrzymujemy wartość inną, aniżeli wtedy gdy obliczamy go na zasadzie obserwacyi zmian w ciśnieniu, wywieranem przez stałą objętość gazu, którego temperatura się podnosi. Davy, opierając się na swoich własnych doświadczeniach, wygłosił zdanie, że rozszerzalność powietrza jest niezależna od jego ciśnienia lub od jego gęstości, zdania tego jednak nie potwierdziły doświadczenia Regnault'a. Ten ostatni badał najprzód powietrze przy ciśnieniu słabszem, aniżeli ciśnienie jednej

atmosfery ($^1/_5$ lub $^1/_6$ atmosf.), następnie zaś przy ciśnieniu 4 do 5 atmosfer i przekonał się, że przy tych samych warunkach temperatury powietrze rozszerza się tem bardziej, im większą jest jego gęstość, to jest im bardziej cząstki jego są do siebie zbliżone. Podobne doświadczenia Regnault urządzał także z innemi gazami i zawsze dochodził do tego samego rezultatu. Naprzykład spółczynnik rozszerzalności kwasu węglanego przy ogrzaniu od 0^0 do 100^0, równy 0,3685 gdy gęstość jego równa 1, wynosi już 0,3752 przy gęstości 2,2976, wzrasta zaś do wartości 0,3859 gdy gęstość równa 4,7318.

Z licznych prac Regnault'a wynika, że spółczynniki rozszerzalności różnych gazów tembardziej zbliżają się do jednej wspólnej wartości, im słabszem jest ciśnienie, przy którem bada się te gazy. Prawo Gay-Lussac'a, że wszystkie gazy mają jeden i ten sam spółczynnik rozszerzalności, stosuje się właściwie do substancyj lotnych w stanie nadzwyczajnego rozrzedzenia. W ogóle można tutaj powtórzyć to, co po części powiedzieliśmy już przy prawie Mariotte'a (str. 170), a mianowicie, że w miarę jak temperatura się podnosi i ciśnienie słabnie, gazy zbliżają się do *idealnego stanu gazowego*, któremu odpowiadają dla wszystkich gazów jednakowe spółczynniki rozszerzalności i ściśliwości. Innemi słowy, każdy gaz przy pewnej dostatecznie wysokiej temperaturze i dostatecznem rozrzedzeniu stosowałby się ściśle do praw Mariotte'a i Gay-Lussac'a.

Gęstością gazu nazywamy często stosunek wagi tego gazu do równej objętości powietrza, wziętego przy tych samych warunkach ciśnienia i temperatury. Przy oznaczaniu gęstości gazów należy zwracać daleko większą uwagę na temperaturę, aniżeli przy oznaczaniu gęstości ciał stałych i cieczy, albowiem gęstość gazów, dzięki wielkiej ich rozszerzalności pod wpływem ciepła, zależy w nader znacznym stopniu od temperatury. Podane określenie gęstości gazu wtedy tylko byłoby ścisłem, gdyby prawo Mariotte'a, że objętość gazu jest odwrotnie proporcyonalna do ciśnienia oraz prawo Gay-Lussac'a, że wszystkie gazy rozszerzają się jednakowo pod wpływem ciepła, były zupełnie słuszne. Jakkolwiek zboczenia od tych praw są bardzo małe, to jednak

ściślejszem jest następujące określenie: gęstością gazu nazywamy stosunek wag równych objętości gazu i powietrza atmosferycznego przy temperaturze 0^0 i ciśnieniu 760 milim. Niechaj gęstość ta będzie równą d. Przy tej samej temperaturze, lecz przy innem jakiem ciśnieniu H, gęstość d powiększy się lub zmniejszy stosownie do powiększenia lub zmniejszenia ciśnienia. Jeżeli zaś przy niezmiennem ciśnieniu H gaz zostanie ogrzany do temperatury t, rozszerzy się on w stosunku V do $V + k_t$. gdzie k oznacza spółczynnik rozszerzalności tegoż gazu, a gęstość jego zmniejszy się w tym samym stosunku.

Chcąc tedy oznaczyć gęstość gazu, należy porównać wagę jednakowych objętości tegoż gazu i powietrza przy temperaturze 0^0 i ciśnieniu 760 milim. Następnie znając wagę jednego litra powietrza można już określić bezwzględną wagę danej masy gazu.

Pierwsi, którzy przedsięwzieli ściślejsze badania w tym kierunku byli Arago i Biot. Przy oznaczaniu gęstości gazów odnośnie do powietrza atmosferycznego, posługiwali się oni metodą następującą. Szklany balon objętości około 6 litrów, zaopatrzony w szyjkę z kranem (patrz str. 141), napełnia się suchem powietrzem i waży przy danem ciśnieniu barometrycznem oraz temperaturze. Niechaj istotna waga jego będzie równa P. Następnie wypompowuje się zeń powietrze, o ile to jest możliwe, zamyka kran i waży powtórnie; jeżeli teraz istotna waga balonu wynosi p, to $P - p$ stanowi wagę wypompowanego powietrza. Za pomocą rachunku, w który wchodzą ciśnienie, temperatura, spółczynniki rozszerzalności powietrza i szkła, dowiadujemy się jaką byłaby waga powietrza, wypełniającego balon przy temperaturze 0^0 i ciśnieniu 760 milim. Poczem do balonu, możliwie przedtem wypróżnionego, wprowadza się gaz, którego gęstość ma być oznaczoną, następnie wypompowuje się ten gaz, wprowadza nową ilość do balonu i tak naprzemian, dopóki nie jest się pewnym, że balon nie zawiera już śladów powietrza lub wilgoci, lecz jedynie suchy gaz. Wtedy zamyka się kran, przyczem obserwuje się stan barometru i temperaturę w chwili zamknięcia i waży napełniony balon; otrzymuje się wagę P'. Następnie wypom-

powuje się badany gaz i waży balon powtórnie; jeżeli obecnie waga jego jest równa p', to $P' — p'$ stanowi wagę wypompowanego gazu. I znów za pomocą rachunku analogicznego, dowiadujemy się, jaką byłaby waga badanego gazu, wypełniającego balon przy 0° i ciśnieniu 760 milim. Gęstość zaś tegoż gazu odnośnie do powietrza równa się ilorazowi, otrzymanemu z podzielenia tej wagi przez poprzednio otrzymaną wagę powietrza. Biot i Arago oznaczyli w ten sposób gęstość *tlenu* (1,10359 jeżeli gęstość powietrza atmosferycznego przyjmiemy za 1), *azotu* (0,96913), *wodoru* (0,07321), *kwasu węglanego* (1,51961), *amoniaku* (0,59669), *gazowego kwasu solnego* (1,24740).

W celu znalezienia gęstości powietrza atmosferycznego odnośnie do wody Biot i Arago ważyli ten sam balon napełniony wodą i ze znalezionej jej wagi oraz ze znanej rozszerzalności tej cieczy jakoteż i naczynia, obliczyli wiele sześciennych centymetrów wody przy 0° mieści się w balonie. Dzieląc następnie znaną wagę powietrza, napełniającego balon przy 0°, przez znalezioną ilość, otrzymali wagę jednego sześciennego centymetra powietrza, czyli jego *ciężar właściwy*. Znaleźli oni liczbę 0,001299075.

Opisana metoda oznaczania gęstości gazów jest bardzo dokładna, pomimo to jednak jest rzeczą nadzwyczaj trudną otrzymać przy jej pomocy rezultaty zupełnie pewne, a to dlatego, że ścisłe obliczenie istotnej wagi balonu, a więc i powietrza, wycieśnionego przez tenże balon, przedstawia ogromne trudności. Jest to zaś koniecznem z tego względu, że często szukana waga gazu jest mniejsza od wagi wycieśnionego przez balon powietrza. Powietrze w którem odbywają się ważenia, zmienia ustawicznie swój skład, stan wilgotności oraz temperaturę. Oprócz tego balon zawsze zgęszcza na swej powierzchni znaczną ilość pary wodnej, a ponieważ ilość jej w powietrzu jest zmienna, wynika z tego, że waga balonu w rozmaitym czasie bywa różną, co jest tem gorsze, że nie ulega obliczeniu.

Trudności te usunął Regnault za pomocą wielce dowcipnego ulepszenia powyższej metody. Zamiast gwichtów, jakie dla zrównoważenia balonu kładziono na szalce wagi, używał on drugie-

go balonu z tego samego szkła i możliwie tej samej zewnętrznej objętości. Zawiesza go się pod szalką zupełnie tak samo, jak i pierwszy balon (fig. 412); obadwa, znajdując się w tej samej warstwie powietrza, wycieśniają jednakowe objętości tego gazu o jednakowym składzie. Wszystkie zmiany powietrza wpływają z obu stron jednakowo tak, że wagi będąc raz doprowadzone do stanu równowagi, pozostają w nim niezależnie od zmian ciśnienia barometrycznego i temperatury.

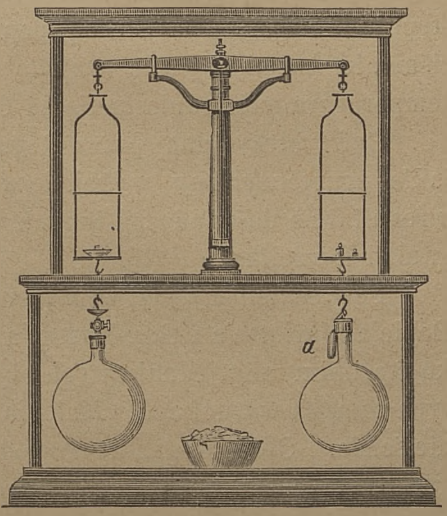


Fig. 412. Metoda Regnault'a oznaczania gęstości gazów.

Ażeby zrównać zewnętrzne objętości obu balonów, Regnault napełnił je wodą i ściśle zrównoważył w powietrzu, następnie zanurzył je w jednem naczyniu z wodą. Ewentualnie mniejszy z dwóch balonów wycieśniał wtedy mniejszą objętość wody, aniżeli większy balon, przez co równowaga ulegała naruszeniu, albowiem pierwszy mniej tracił na wadze; dla przywrócenia równowagi należało po stronie większego balonu dołożyć np. n gramów. Otóż wtedy Regnault na mniejszym balonie zawiesił zamknięte na obu końcach szklane naczyńko a, takiej wielkości, że wycieśniało n sześciennych centymetrów wody, przez co wreszcie doszedł do tego, że mniejszy balon wycieśniał akuratnie taką samą objętość wody lub powietrza, jak balon większy. Gdy następnie po dołożeniu odpowiedniej ilości gwichtów do lżejszego balonu doprowadzono przyrząd do stanu równowagi w powietrzu, utrzymywała się ona także po zanurzeniu obu balonów w wodzie oraz w powietrzu, którego gęstość i temperatura ulegały zmianie. Balony wypróżniono i osuszono, a jeden z nich służący tylko jako przeciwaga, hermetrycznie zamknięto. Przed rozpoczęciem doświadczeń próbowano jeszcze czy zewnętrzne objęto-

ści obu balonów są istotnie równe. W tym celu zamykano także kran balonu, do którego miano wprowadzić badane gazy i po doprowadzeniu do równowagi pozostawiono balony, wiszące u szalek, przez dni piętnaście. Równowaga w najmniejszym nawet stopniu nie została naruszoną, pomimo iż w tym przeciągu czasu ciśnienie barometryczne wahało się pomiędzy 741 m. i 771 m., temperatura zaś podniosła się od 0^0 do 17^0.

Cyfry otrzymane przez Regnault'a różnią się nieco od tych jakie przytoczyliśmy wyżej, lecz zgadzają się prawie zupełnie z rezultatem doświadczeń innych uczonych, jak Dumas, Boussingault i Berzelius.

Powiedzieliśmy już, że z powodu zbaczania gazów od praw Boyle'a-Mariotte'a i Gay-Lussac'a, określenie gęstości gazów jako stosunku wag jednakowych objętości gazu i powietrza przy tych samych warunkach ciśnienia i temperatury, nie jest zupełnie ścisłe. Otóż Regnault dowiódł tego za pomocą całego szeregu doświadczeń. Dla gazów bardzo trudno ściśliwych, jak powietrze, wodór, tleni azot, znalazł on wprawdzie, że gęstość oznaczona podług tego określenia zgadza się z gęstością, znalezioną przy 0^0 i ciśnieniu 760 milim., czyli, że gęstość wymienionych gazów odnośnie do powietrza jest niezależna od ciśnienia i temperatury. Inaczej zachowuje się kwas węglany i w ogóle gazy blizkie punktu skroplenia. Przy temperaturze 0^0 stosunek wagowy kwasu węglanego i powietrza przy tem samem ciśnieniu wynosił:

przy 224,17	mm.	1,52145
„ 374,13	„	1,52366
„ 760,00	„	1,52910.

Widzimy tedy, że przy temperaturze 0^0 gęstość kwasu węglanego wzrasta, wraz z ciśnieniem; a to dla tego, że gaz ten jest bardzo ściśliwy.

Co do wpływu temperatury to stosunek wagi kwasu węglanego i powietrza, napełniających balon przy 100^0 i ciśnieniu 760 milim, równa się tylko 1,52418 tak, że gęstość kwasu węglanego odnośnie do powietrza przy tej samej temperaturze zmniejsza się w miarę wzrostu temperatury. Okazało się natomiast, że przy

emperaturze 100° gęstość kwasu węglanego, odnośnie do powietrza przy tem samem ciśnieniu, jest niezależna od ciśnienia. lbowiem przy 100° stosunek wagowy jednakowych objętości wasu węglanego i powietrza, pozostających pod ciśnieniem 83,39 mm., okazał się prawie równym stosunkowi przy ciśnieiu 760 mm., wynosił mianowicie 1,5241. Wynika z tego, że rzy 100° i przy powiększeniu ciśnienia od 383 mm. do 760 mm. was węglany nie zostaje bardziej ścieśniony od powietrza, czyli przy tej temperaturze kwas węglany tak samo ulega prawu ariotte'a jak powietrze atmosferyczne.

Regnault posługiwał się także opisanym wyżej balonem przy naczaniu wagi jednego sześciennego centymetra powietrza zy 0° i ciśnieniu 760 mm. i otrzymał liczbę 0,00129318. wagi tej oraz z przytoczonych gęstości azotu, tlenu, wodoru kwasu węglanego oblicza się wagę jednego sześc. cm. tych gaw, zkąd łatwo już obliczyć także wagę dowolnej ilości każde z nich przy jakiejkolwiek temperaturze i ciśnieniu.

ROZDZIAŁ II.

Zmiana stanów skupienia[1]).

§ 1. Topienie. Rozpuszczanie w cieczy.

W poprzednim rozdziale obszernie mowiliśmy o tem, że ciastałe pod wpływem ogrzewania rozszerzają się. Otóż jeżeli rzewanie to jest dostatecznie silne, wtedy wpływ jego objawia jeszcze w inny sposób, a mianowicie ciało stałe zmienia swój an skupienia i przechodzi w ciało ciekłe, czyli topi się.

Liczne ciała pod działaniem dostatecznie wysokiej temperary przechodzą odrazu ze stanu stałego w ciekły, nie przedsta-

---

[1]) Przez pomyłkę tytuł rozdziału II-go wydrukowano obok tytułu rozdziału I-go ejszej księgi.

ści obu balonów są istotnie równe. W tym celu zamykano także kran balonu, do którego miano wprowadzić badane gazy i po doprowadzeniu do równowagi pozostawiono balony, wiszące u szalek, przez dni piętnaście. Równowaga w najmniejszym nawet stopniu nie została naruszoną, pomimo iż w tym przeciągu czasu ciśnienie barometryczne wahało się pomiędzy 741 m. i 771 m., temperatura zaś podniosła się od 0° do 17°.

Cyfry otrzymane przez Regnault'a różnią się nieco od tych jakie przytoczyliśmy wyżej, lecz zgadzają się prawie zupełnie z rezultatem doświadczeń innych uczonych, jak Dumas, Boussingault i Berzelius.

Powiedzieliśmy już, że z powodu zbaczania gazów od praw Boyle'a-Mariotte'a i Gay-Lussac'a, określenie gęstości gazów jako stosunku wag jednakowych objętości gazu i powietrza przy tych samych warunkach ciśnienia i temperatury, nie jest zupełnie ścisłe. Otóż Regnault dowiódł tego za pomocą całego szeregu doświadczeń. Dla gazów bardzo trudno ściśliwych, jak powietrze, wodór, tlen i azot, znalazł on wprawdzie, że gęstość oznaczona podług tego określenia zgadza się z gęstością, znalezioną przy 0° i ciśnieniu 760 milim., czyli, że gęstość wymienionych gazów odnośnie do powietrza jest niezależna od ciśnienia i temperatury. Inaczej zachowuje się kwas węglany i w ogóle gazy blizkie punktu skroplenia. Przy temperaturze 0° stosunek wagowy kwasu węglanego i powietrza przy tem samem ciśnieniu wynosił:

przy	224,17 mm.	1,52145
„	374,13 „	1,52366
„	760,00 „	1,52910.

Widzimy tedy, że przy temperaturze 0° gęstość kwasu węglanego wzrasta, wraz z ciśnieniem; a to dla tego, że gaz ten jest bardzo ściśliwy.

Co do wpływu temperatury to stosunek wagi kwasu węglanego i powietrza, napełniających balon przy 100° i ciśnieniu 760 milim, równa się tylko 1,52418 tak, że gęstość kwasu węglanego odnośnie do powietrza przy tej samej temperaturze zmniejsza się w miarę wzrostu temperatury. Okazało się natomiast, że przy

temperaturze 100° gęstość kwasu węglanego, odnośnie do powietrza przy tem samem ciśnieniu, jest niezależną od ciśnienia. Albowiem przy 100° stosunek wagowy jednakowych objętości kwasu węglanego i powietrza, pozostających pod ciśnieniem 383,39 mm., okazał się prawie równym stosunkowi przy ciśnieniu 760 mm., wynosił mianowicie 1,5241. Wynika z tego, że przy 100° i przy powiększeniu ciśnienia od 383 mm. do 760 mm. kwas węglany nie zostaje bardziej ścieśniony od powietrza, czyli że przy tej temperaturze kwas węglany tak samo ulega prawu Mariotte'a jak powietrze atmosferyczne.

Regnault posługiwałsię także opisanym wyżej balonem przy oznaczaniu wagi jednego sześciennego centymetra powietrza przy 0° i ciśnieniu 760 mm. i otrzymał liczbę 0,00129318. Z wagi tej oraz z przytoczonych gęstości azotu, tlenu, wodoru i kwasu węglanego oblicza się wagę jednego sześc. cm. tych gazów, zkąd łatwo już obliczyć także wagę dowolnej ilości każdego z nich przy jakiejkolwiek temperaturze i ciśnieniu.

ROZDZIAŁ II.

Zmiana stanów skupienia [1].

§ 1. Topienie. Rozpuszczanie w cieczy.

W poprzednim rozdziale obszernie mowiliśmy o tem, że ciała stałe pod wpływem ogrzewania rozszerzają się. Otóż jeżeli ogrzewanie to jest dostatecznie silne, wtedy wpływ jego objawia się jeszcze w inny sposób, a mianowicie ciało stałe zmienia swój stan skupienia i przechodzi w ciało ciekłe, czyli topi się.

Liczne ciała pod działaniem dostatecznie wysokiej temperatury przechodzą odrazu ze stanu stałego w ciekły, nie przedsta-

---

[1]) Przez pomyłkę tytuł rozdziału II-go wydrukowano obok tytułu rozdziału I-go niniejszej księgi.

wiając przytem, w sposób widoczny, stanów pośrednich. Temperatura, przy której ciało zmienia swój stan skupienia, jest ściśle określoną i niezmienną przy tem samem ciśnieniu, zowie się ona *temperaturą topliwości*; jest ona tak stałą i charakterystyczną dla ciał, że w niektórych wypadkach stanowi środek do poznania pewnej substancyi lub do ocenienia stopnia jej czystości.

Pod względem temperatury topliwości rozmaite ciała przedstawiają różnice nader znaczne. Począwszy np. od kwasu siarkowego, który topi się przy — 100° a skończywszy na platynie, topniejącej przy 2000°, można ułożyć szereg ciał, których temperatura topliwości przebiega wszystkie stopnie skali termometrycznej. Zjawiska dawniej już zaobserwowane, jako też rezultaty nowszych doświadczeń, pokazują, że w miarę wynajdywania coraz nowych środków do wytwarzania bardzo wysokich temperatur, zmniejsza się liczba ciał uważanych za nietopliwe pod wpływem ciepła. Znaczna ilość ciał, które uchodziły dawniej za najbardziej nietopliwe, zostały stopione. I tak Gaudin stopił kwarc i wapno, Despretz stopił za pomocą prądu galwanicznego krzem, bor, tytan i molybden. Ten ostatni uczony podaje, że udało mu się doprowadzić węgiel do stanu zmiękczenia i że nawet w naczyniach, w których ciało to się znajdowało, pojawiły się wyraźne, stopione kulki. Należy zauważyć jeszcze, że niektóre ciała stałe pod wpływem ogrzewania, zamiast topić się, ulegają rozkładowi, jak np. węglan wapnia, celuloza i t. p. Węglan wapnia topi się wprawdzie, gdy jest ogrzewany w naczyniu o silnych ścianach i hermetycznie zamkniętem; ciało to częściowo ulega wtedy rozkładowi i wydziela kwas węglany, który wywiera pewne określone ciśnienie, przyczem pozostała nierozłożona część węglanu wapnia topi się. Niektóre wreszcie ciała stałe pod wpływem ciepła nie odrazu ulegają zmianie tego stanu w stan ciekły, lecz przechodzą kilka stanów pośrednich, jednocześnie zaś termometr wskazuje wtedy stopniowe podnoszenie się temperatury. Z początku ciastowato-miękie stają się coraz bardziej ciekłe. Szkło np. w stanie takiej miękkości jest nader plastyczne; można je wtedy wydymać, wyciągać w długie nici i w ogóle nadawać mu wszelkie dowolne kształty. Również żelazo i platyna

przechodzą, przed stopieniem, przez taki stan pośredni, w którym są bardziej miękkie i łatwiej dają się kuć.

Powiedzieliśmy wyżej, że temperatura ciała topniejącego jest stałą; innemi słowy jest ona niezależną od temperatury tego źródła ciepła, które ogrzewa to ciało. Jeżeli w danym przeciągu czasu ciało otrzymuje większą ilość ciepła, wtedy topi się szybciej, lecz temperatura jego nie zmienia się. Własność ta pozwoliła nam wszakże oznaczyć jeden ze stałych punktów na skali termometrycznej. Dopiero wtedy, gdy już cała masa ciała przeszła w stan ciekły, dalsze ogrzewanie wpływa na podniesienie jego temperatury.

Fakt ten pierwszy zauważył Deluc przy topieniu lodu. Dowodzi on, że chcąc przeprowadzić jakieś ciało ze stanu stałego w ciekły, nie dosyć jest ogrzać je do temperatury topliwości, lecz tak ogrzanemu ciału należy jeszcze dostarczać wciąż tego, co nazywamy ciepłem. Ciepło to nie podnosi temperatury ciała, lecz przy niezmiennej jego temperaturze zużywa się na zamianę jego w ciało ciekłe. Ponieważ dla termometru ciepło to znika całkowicie, otrzymało ono nazwę *ciepła utajonego*.

Następujące doświadczenie Black'a dowodzi w sposób bardzo wymowny, że przy topieniu ciała pewna ilość ciepła ulega utajeniu. Zmieszajmy kilogram drobno tłuczonego lodu, mającego dokładnie temperaturę 0^{0}, z kilogramem wody przy temperaturze 80^{0} i poruszajmy dostatecznie tę mieszaninę, a lód całkowicie się stopi. Przy zachowaniu pewnej ostrożności otrzymamy wtedy 2 kilogramy wody, mającej temperaturę 0^{0}. Wynika z tego, że całe ciepło, jakie oddał kilogram wody przy oziębieniu od 80^{0} do 0^{0}, zostało zużyte na to, ażeby kilogram lodu przy 0^{0} zamienić w kilogram wody przy 0^{0}, temperatura zaś wcale się przytem nie podnosi. W istocie tedy podczas topienia ciał ciepło znika jako takie i zużywa się na przezwyciężenie spójności cząstek ciała stałego. Fakt ten czytelnik zrozumie dopiero wtedy, gdy pozna teoryę ciepła.

Zgodzono się, ażeby tę ilość ciepła, jaką przy stopieniu pochłania jednostka wagi danego ciała, nazwać utajonem ciepłem topliwości tego ciała. W jednym z następnych rozdziałów po-

znamy metody, pozwalające mierzyć te ilości ciepła, tutaj nadmienimy tylko, że jednostka wagi każdej substancyi potrzebuje do stopienia stałej ilości ciepla i że liczba wyrażająca ją, jest nową daną specyficzną, służącą do scharakteryzowania substancyi.

Ciało, topiąc się, powiększa swą objętość. Znamy tylko kilka wyjątków z tego ogólnego prawa, a mianowicie lód, lane żelazo, bizmut, antymon i srebro. Zwykle zmiana objętości występuje nagle w chwili topienia. Billet jeden z pierwszych oznaczył rozszerzenie, jakie wtedy następuje; badał on fosfor, siarkę i jod. Kopp rozciągnął badania podobne na większą ilość substancyj. Gdy chodziło o takie naprzykład cialo jak stearyna, używał on termometru z rurką, podzieloną jak zwykle na części o jednakowej objętości; stosunek tych części do objętości zbiornika był wiadomy. Stearynę w stanie ciekłym wprowadzano do przyrządu i pozwalano jej w nim zakrzepnąć, następnie ogrzewano ten rodzaj termometru i obserwowano objętości, jakie kolejno zajmowala stearyna przy rozmaitych temperaturach. Znając spółczynnik rozszerzalności sześciennej szkła przyrządu, można było oznaczyć absolutne powiększanie się objętości, zajętej przez stałe ciało, napełniające termometr, oraz ocenić nagłą jej zmianę, towarzyszącą stopieniu. Stała stearyna przedstawia tę ciekawą właściwość, że przy 50^0 objętość jej zmniejsza się nagle w stosunku 1 do 0,9775, następnie od 50^0 do 60^0 rozszerza się w sposób zwykły; topi się przy 60^0 i w tej chwili objętość jej powiększa się odrazu w stosunku 1 do 1,0496.

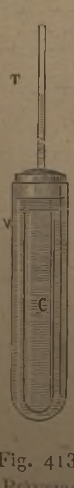


Fig. 413. Przyrząd Koppa.

Gdy badane ciało było twardszem od poprzedniego, Kopp wprowadzał je pod postacią walca do szklanego naczynia tak, że ono napełniało je całkowicie (fig. 413 C.); naczynie zaś z kolei umieszczał w długim zbiorniku *V*, podobnym do zbiornika termometru i połączonym z wązką rurką *T*, podzieloną na części o jednakowej objętości. Rurka i zbiornik są połączone za pomocą nieprzemakalnego korka. Zbiornik i część rurki napełnia się cieczą, nie działającą chemicznie na dane ciało stałe (zawarte w naczyniu *C*) i rozszerzalność której dla ro-

zmaitych temperatur jest znaną. Ponieważ znano także wagę wprowadzonego ciała stałego oraz wagę cieczy, napełniającej przyrząd do 0 podziałek, można było obliczać, na zasadzie gęstości , objętość obu substancyj przy danej temperaturze. Gdy następnie przyrząd zanurzono w kąpieli z oliwy, którą stopniowo ogrzewano, wtedy zmiana wysokości słupa cieczy w rurce *T* pozwalała śledzić za powiększaniem się objętości ciała stałego przy rozmaitych punktach skali termometrycznej, a więc także w chwili zmiany stanu jego w ciekły. Przytaczamy tutaj niektóre rezultaty Kopp'a [1]):

	Temperatura topliwości	Nagła zmiana objętości podczas topienia w stosunku
Fosfor	44°	1 do 1,0343
Siarka	115°	1 do 1,0500
Wosk	64	nieznaczne
Kwas stearynowy	70°	1 do 1,1100
Stearyna	60°	1 do 1,0496.

Kopp mierzył także kurczenie się lodu w chwili topienia i znalazł, że objętość jego zmieniała się w stosunku 1 do 0,814. Ciekawy ten fakt objaśnia wiele zjawisk, o których będziemy mówili w następnym paragrafie.

Dawniej sądzono, że temperatura topliwości ciała jest niezależna od zewnętrznych warunków, lecz Thomson i Clausius, drogą teoretycznych rozumowań, doszli do wniosku, że zmiana ciśnienia, pod jakiem cialo pozostaje, musi wpływać także na zmianę jego temperatury topliwości. Jeżeli topieniu towarzyszy powiększenie objętości, to oczywiście, że wszystko co przeszkadza rozszerzaniu się ciała stalego, musi opóźniać przejście jego w stan ciekły; stosuje się to do większości ciał. Przeciwnie dla substancyj, które przy przejściu ze stanu stałego w ciekły zmniejszają swą objętość, jak np. lód, bizmut, każdy czynnik, wplywający na zbliżanie się ich cząstek, musi przyśpieszać topienie tak, że ono może wtedy rozpocząć się przy niższej temperaturze. I tak

---

[1]) Boutan et d'Almeida. Cours de Physique.

lód przy ciśnieniu większem od ciśnienia atmosferycznego, powinien topić się przy temperaturze niższej, aniżeli 0°. Teoretyczne te wyniki J. Thomsona i Clausiusa znalazły potwierdzenie na drodze doświadczalnej, mianowicie William Thomson dowiódł ich prawdziwości dla wody, Bunsen zaś dla dwóch innych ciał. William Thomson ściskał lód w przyrządzie, podobnym do tego, jakim posługiwano się przy badaniu ściśliwości gazów i znalazł, że przy ciśnieniu 8,1 atmosfer, temperatura jego topliwości spadła do — 0,0585° C, przy ciśnieniu zaś 16,8 atmosfer do — 0,1287° C.

Doświadczenie W. Thomsona powtórzył następnie w nieco zmienionej formie Mousson i otrzymał równie zadawalniające rezultaty. Ściskał on wodę i przekonał się, że gdy jednocześnie była wystawiona na wpływ niskiej temperatury, lecz wysokiego ciśnienia, wtedy nie ulegała zamarzaniu; innym znów razem ściskał lód i pokazał, że przy nizkiej temperaturze ciało to topiło się. W tem ostatniem doświadczeniu Mousson, chcąc wywierać bardzo silne ciśnienie, zmuszony był posługiwać się nader mocnem naczyniem metalowem. Ponieważ nieprzezroczyste ściany tego naczynia nie pozwalały dojrzeć, w jakiej mianowicie chwili lód zmieniał swój stan, eksperymentator uciekł się do następującego sposobu.

Stalowy pryzmat *P* (fig. 414), wydrążono na wylot w kierunku jego długości; powstały przez to kanał można było od dołu silnie zamknąć za pomocą szruby *O*, z góry zaś, również za pośrednictwem szruby i mutry *E*, można było weń wciskać tłok *A*. Otóż po zamknięciu górnego otworu i odwróceniu, napełniono wydrążenie przegotowaną wodą, wpuszczono mały kawałek miedzi i wystawiono przyrząd na działanie zimna. Woda zamarzła i utworzyła massywny cylinder lodu *K*. Następnie zaciśnięto silnie dolną szrubę *O* i przymocowano przyrząd w taki sposób, że ów kawałek miedzi, zamrożony wewnątrz lodu, znajdo-

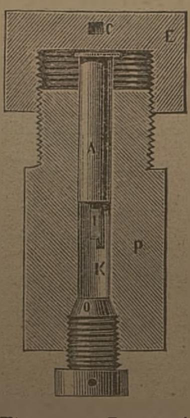


Fig. 414. Przyrząd Moussona.

wał się obecnie u góry (*J*), tuż pod tłokiem. W celu uniknięcia wszelkiego ogrzania, otoczono cały przyrząd mieszaniną oziębiającą, której temperatura dochodziła do 18^0 poniżej zera. Gdy wciśnięto tłok do wnętrza wydrążenia na 9 blizko milimetrów, przez co wytworzono tam ciśnienie równe, według Moussona, 13000 atmosfer i następnie otworzono dolną szrubę *O*, wtedy z otworu wyszedł najprzód ów kawałek miedzi, po nim zaś walec lodu. Dowodzi to, że pod wpływem wielkiego ciśnienia, jakie tłok wywierał na lód, ten ostatni zamienił się w wodę, wskutek czego miedź spadła na dolną szrubę, jakkolwiek przy wyjmowaniu tej szruby stopiony lód w obec nieustającego zimna znów zamarzał.

Doświadczenie to pokazuje, że przy owem wysokiem ciśnieniu i temperaturze — 18^0 lód znajdował się w stanie ciekłym, czyli, że jego temperatura topliwości obniżyła się wtedy o 18^0.

Widzimy tedy, że temperatura topliwości lodu nie jest zupełnie stałą, zmienia się bowiem zależnie od zewnętrznego ciśnienia; z drugiej jednak strony zmiany te przy niewielkich wahaniach w ciśnieniu są tak nadzwyczajnie małe, że przy określaniu jednego ze stałych punktów na termometrze temperaturę topliwości lodu można uważać za stałą.

Co do podnoszenia się temperatury topliwości innych ciał pod wpływem ciśnienia, to Bunsen dowiódł tego dla olbrotu i parafiny, przyczem okazało się, że zmiany tej temperatury są daleko znaczniejsze, aniżeli dla wody. Do podobnych rezultatów doszedł także Hopkins przy badaniu temperatury topliwości olbrotu, wosku, siarki i stearyny. Pod ciśnieniem 1 atmosfery wosk np. topi się przy $64^0,5$ C, pod ciśnieniem 519 atmosfer temperatura ta wynosi już $74^0,5$ C, wreszcie pod ciśnieniem 792 atmosfer dochodzi ona do $80^0,2$ C.

Temperatura topliwości mieszaniny, powstałej przez stopienie kilku substancyj, różni się zawsze od temperatury topliwości każdej z tych substancyj, wziętej oddzielnie, przyczem pierwsza jest zwykle niższą od ostatniej. Naprzykład *ołów* topi się przy 330^0C, *bizmut* przy 265^0C, *cyna* przy 230^0C, stop zaś składający się z ośmiu części ołowiu, ośmiu części bizmutu i trzech części cy-

ny, topi się już przy 94°,5 C, a więc zamienia się w ciecz po wrzuceniu do wrzącej wody. Stop z jednej części cyny i półtory części ołowiu topi się przy 211° C. Temperatura topliwości mięszaniny kwasów tłuszczowych jest zawsze niższa od temperatury topliwości kwasu najtrudniej topliwego i często niższą od temperatury topliwości kwasu, który najłatwiej się topi. Nawet gdy do mięszaniny dwóch kwasów dodamy nieco substancyi trudniej topliwej, temperatura topliwości jeszcze się obniża. I tak np. kwas stearynowy topi się przy 70°, kwas palmitynowy przy 62°, mieszanina zaś z 30 części pierwszego i 70 części drugiego topi się już przy 55°. Dla innych jeszcze substancyj zaobserwowano obniżenie temperatury topliwości w mieszaninie i spożytkowano fakt ten w celach technologicznych. Rozmaite środki, służące do tego, ażeby trudno topliwe metale uczynić łatwiej topliwemi, opierają się na znajomości tego faktu. Często substancya dodawana w tym celu do innej, jest trudniej topliwą, aniżeli ta ostatnia. Stal np. topi się łatwiej, niż żelazo, różni się zaś od niego jedynie zawartością węgla.

Ciało stałe może także zmienić swój stan skupienia w warunkach, zupełnie odmiennych od tych, o jakich mówiliśmy dotychczas. I tak np. rozpuszczanie się soli kuchennej lub cukru w wodzie, jodu w alkoholu, siarki i fosforu w siarku węgla, można porównać do topienia, tutaj bowiem, podobnie jak i tam, cząstki ciała stałego oddalają się od siebie. Podczas rozpuszczania ciał stałych zachodzi również zjawisko utajania się ciepła. Wrzućmy do wody drobno sproszkowaną sól i rozpuśćmy ją szybko za pomocą wstrząsania, a zobaczymy, że zanurzony w cieczy termometr znacznie się obniży. Jedna część drobno sproszkowanego salmiaku, rozpuszczając się szybko w dwóch częściach wody, powoduje obniżenie temperatury równe 20°.

Przy rozpuszczaniu rozdział cząstek jest jeszcze zupełniejszy, aniżeli przy topieniu. Ciało, które się rozpuszcza, pochłania najprzód ciepło topliwości, oprócz tego pochlania ono jeszcze pewną ilość ciepła, które się zużywa na rozprowadzenie cząstek jego po całej masie cieczy, to jest na jego dyffuzyę. Jeżeli przy rozpuszczaniu nie zachodzi żadna reakcya chemiczna, cie-

pło pochłonięte przez ciało, które się rozpuszcza, stanowi sumę dwóch ilości: ciepła topliwości i ciepła dyffuzyi. Person dowiódł, że roztwór pochłania tem więcej ciepła, im bardziej rozcieńcza go się wodą. Przygotowanie roztworu z jednego grama soli wymaga rozmaitej ilości ciepła, zależnie od ilości wody, w której się sól rozpuszcza. Im mniej jest wody, a więc im bardziej stężonym jest roztwór, tem mniej potrzeba ciepła do wytworzenia roztworu. Fakt ten staje się zrozumiałym w obec tego, że jak powiedzieliśmy, pewna ilość ciepła zużywa się na rozprowadzenie cząstek ciała rozpuszczonego po całym rozpuszczalniku. Jeżeli ta ilość ciepła, która się zużywa przy przejściu ciała ze stanu stałego w ciekły, czyli ciepło topliwości, jest niezależne od ilości rozpuszczalnika, to ciepło dyffuzyi musi wzrastać w miarę coraz większej ilości tego ostatniego, albowiem cząstki ciała rozpuszczonego przebywają wtedy dłuższe drogi.

Zjawisko pochłaniania ciepła przy rozpuszczaniu się niektórych ciał stałych znalazło praktyczne zastosowanie, a mianowicie w przygotowywaniu tak zwanej *mieszaniny oziębiającej*. Jeżeli np. podczas rozpuszczania się jakiejś soli w wodzie nie dopuścimy z zewnątrz żadnego ciepła, wtedy rozpuszczająca się sól będzie je czerpała z samej cieczy, wskutek czego ta ostatnia ulegnie oziębieniu. Widzieliśmy wyżej, że mięszanina jednej części salmiaku z dwiema częściami wody może spowodować obniżenie temperatury równe 20°. Mieszanina śniegu lub tłuczonego lodu z solą stanowi źródło daleko większego obniżenia temperatury, aniżeli mieszanina wody z solą. Dzięki przyciąganiu, istniejącemu pomiędzy cząstkami soli i cząstkami śniegu, ten ostatni topi się, w cieczy zaś powstałej w ten sposób, sól się rozpuszcza. Pochłanianie ciepła jest tedy tutaj podwójne: przy przejściu śniegu ze stanu stałego w ciekły oraz przy rozpuszczaniu się soli. Mieszanina taka oziębia się do temperatury zamarzania roztworu, niżej zaś temperatura jej nie spada dlatego, że przy dalszem oziębianiu część wody znów marznie, przyczem, jak wkrótce zobaczymy, wydziela się ciepło, utajone podczas topienia. Ciepło to podnosi znów temperaturę do punktu zamarzania roztworu. Doświadczenie potwierdza to w zupełności. Gdy

zmięszamy 1 kilogram śniegu z $^1/_3$ kilograma soli kuchennej, otrzymamy ciekłą masę o temperaturze — 21° C, która podług Rüdorff'a, jest właśnie temperaturą zamarzania nasyconego roztworu solnego. Mięszanina 3 części krystalicznego chlorku wapnia z 1 częścią śniegu lub tłuczonego lodu powoduje obniżenie temperatury do — 33° C, co także zgadza się z doświadczeniami Rüdorff'a, podług których temperatura zamarzania podobnego roztworu ma wynosić — 34° C.

Bardzo silną mieszaninę oziębiającą można otrzymać przez zmieszanie śniegu z takiemi cieczami, które dzięki swemu powinowactwu do wody powodują jego topienie i które następnie zmieszane z wodą posiadają bardzo nizką temperaturę zamarzania. Ma to miejsce przy mieszaniu śniegu z kwasem siarczanym, azotnym, solnym lub z innym jakim kwasem, zamarzającym dopiero przy nizkiej temperaturze. Oziębienie stanowi wtedy skutek utajania się ciepła przy przejściu śniegu w stan ciekły, najniższą zaś temperaturą, jaką można wtedy osiągnąć, jest temperatura zamarzania mieszaniny. Należy jednak zauważyć, że przy przygotowaniu mieszaniny oziębiającej ze śniegu i kwasu siarczanego, trzeba pilnie brać pod uwagę stosunek wagowy dwóch tych substancyj. Podczas bowiem gdy 5 części śniegu i 1 część kwasu siarczanego powodują silne oziębienie, to 5 części kwasu siarczanego i 1 część śniegu powodują silne podwyższenie temperatury. Kwas solny wreszcie i siarczan sodu są używane do zamrażania wody w tak zwanych sztucznych lodowniach, obecnie dość rozpowszechnionych; mieszanina 8 cz. siarczanu sodu i 5 cz. kwasu solnego obniża temperaturę do — 16°. Ponieważ codzienne używanie kwasów może stać się niebezpiecznem, lepiej jest używać mieszaniny azotanu amonu i wody; wprawdzie sól ta jest droga, lecz można ją za to, przez wyparowywanie roztworu, ciągle otrzymywać z tego ostatniego w stanie krystalicznym. W każdym jednak razie w obec mieszaniny tej woda marznie tylko wtedy, gdy temperatura otaczającego powietrza nie jest zbyt wysoka.

§ 2. Krzepnienie.

Krzepnienie cieczy stanowi zjawisko wprost przeciwne topieniu się ciał stałych; jak wiemy, te ostatnie topią się, gdy są dostatecznie ogrzane, naodwrót zaś ciecze krzepną, gdy są dostatecznie oziębione. Zjawiska obserwowane podczas topienia powtarzają się w odwrotnym kierunku przy krzepnieniu, a mianowicie termometr, zanurzony w cieczy, wystawionej na działanie zimna, spada z początku, lecz tylko tak długo, dopóki krzepnienie cieczy się nie rozpocznie. Od tej chwili termometr wskazuje *stałą temperaturę przez cały czas krzepnienia*, poczem dopiero znów poczyna spadać. Wynika z tego, że podczas procesu krzepnienia oswobadza się ciepło, albowiem ciało oddaje ciepło swemu otoczeniu dopóki jest od niego cieplejsze, a więc oddaje je tak dobrze podczas krzepnienia, jak i przed niem lub po niem. Ponieważ tedy podczas krzepnienia ciała temperatura jego nie spada, to należy przyjąć, że oddane otoczeniu ciepło zostaje zastąpione przez inne ciepło. W istocie tak jest, albowiem *ciepło utajone przy topieniu oswobadza się napowrót podczas krzepnienia.* Do prawa tego powrócimy w rozdziale o kalorymetryi.

Rozmaite ciecze krzepną przy nader różnych temperaturach, niekiedy bardzo wysokich, niekiedy znów średnich lub nizkich. W miarę wynajdywania coraz to nowych środków do obniżania temperatury, można było otrzymywać w stanie stałym takie ciecze, które do tego czasu znane były tylko w stanie ciekłym. I tak większość skroplonych gazów została zamrożoną, a mianowicie kwas węglany przy — 58°, amoniak przy — 75°, tlenek azotu przy — 100°, azot przy — 200°. Despretz pokazał, że alkohol, otoczony mieszaniną eteru, stałego kwasu węglanego i ciekłego tlenku azotu, przechodzi w stan lepki, pośredni między ciekłym i stałym. Wreszcie Wróblewski i Olszewski określili temperaturę zamarzania takich cieczy, jak chlorek fosforu, który marznie przy — 111°,8 i siarku węgla, który z początku gęstnieje i krzepnie przy — 116°.

Wspomnieliśmy już, że temperatura przy której ciało krzepnie, jest stałą, podobnie jak temperatura topliwości; jest ona nawet, dla jednej i tej samej substancyi, identyczna z tą ostatnią temperaturą. Lód naprzykład topi się przy 0°, przy wyższych temperaturach nie może on już być stałym; podobnie woda w ogóle marznie przy 0°, w zwykłych bowiem warunkach nie może ona pozostać ciekłą przy temperaturze niższej od 0°. Wynika to w ogóle z określenia temperatury topliwości, jako takiej, przy której ciało przechodzi ze stanu stałego w ciekły; jeżeli bowiem własności ciała nie zmieniły się wskutek topienia, to musi ono krzepnąć przy tej samej temperaturze, gdyż w przeciwnym razie byłoby ono już ciekłem poniżej swego punktu topliwości. Temperaturą zamarzania nazywamy tę temperaturę, jaką termometr, zanurzony w cieczy, wskazuje wtedy, gdy krzepnienie jej się rozpoczęło.

Istnieją jednak przykłady które dowodzą, że można oziębić ciecz poniżej jej punktu zamarzania i pomimo to ona nie zmarznie. Fahrenheit pierwszy zauważył to ciekawe zjawisko. Napełnił on wodą szklaną kulę, połączoną z wązką rurką, którą ogrzewał do temperatury wrzenia wody i zalutowywał podczas, gdy ciecz ta wrzała. Przekonał się następnie, że gdy przyrząd oziębił się do — 10° C, woda w nim zawarta była jeszcze ciekła. Lecz w chwili, gdy odłamano zalutowany koniec rurki, cała kula nagle napełnila się lodem. W innym znów wypadku, w którym oziębienie również doszło do — 10° C, cała woda nagle zamarzła po przypadkowem wstrząśnieniu, jakiemu uległa kula. Dowodzi to, że w pierwszym wypadku powodem nagłego utworzenia się lodu nie było powietrze, które wtargnęło po odłamaniu zalutowanego końca rurki; prawdziwą przyczyną było wstrząśnienie towarzyszące odłamaniu. Od owego czasu wiele razy zaobserwowano, że gdy woda spokojnie się oziębia i nie ulega żadnemu wstrząśnieniu, wtedy może ona pozostać ciekłą przy temperaturze zamarzania. Lecz gdy woda taka ulegnie najmniejszemu wstrząśnieniu, albo lepiej gdy zetknie się z kawałkiem lodu, wtedy cała jej masa odrazu zmarznie. Gay-Lussac pokrył wodę cienką warstwą oliwy, chroniącą ją od dostępu powietrza i przy

spokojnem oziębianiu doprowadził jej temperaturę do — 12° C, przy której woda znajdowała się jeszcze w stanie ciekłym. Despretz zaś utrzymał wodę w tym stanie przy temperaturze — 20° C. W każdym jednak razie cała masa wody nagle zamarzała, skoro tylko została dotkniętą przez obce ciało.

Zjawisko to nie jest właściwem tylko wodzie, odnajdujemy je bowiem także w innych ciałach. Można np. utrzymać fosfor w stanie ciekłym przy temperaturze o wiele niższej od jego zwykłej temperatury topliwości, równej 44°,2 pod warunkiem, że będzie się oziębiał w spokojnej wodzie. Figara 415 przedstawia przyrząd, wymyślony przez Gernez'a, który pozwala z łatwością urządzić odnośne doświadczenie z fosforem. Do wielkiego balonu o kilku litrach objętości, napełnionego wodą dystylowaną, wprowadza się dwie długie rurki, zamknięte u dołu i osadzone w szyjce balonu za pomocą korka, przepuszczającego także termometr, który wskazuje temperaturę wody. Każda z rurek zawiera fosfor, pokryty warstwą wody grubości 2 do 3 centymetrów. Doświadczenie rozpoczyna się od tego, że ogrzewa się wodę w balonie do 45° i wprowadza doń obydwie rurki, zawierające stopiony fosfor. Przyrząd pozostawiony samemu sobie oziębia się, przyczem fosfor pozostaje ciekłym poniżej 44°,2. Doświadczenie to może trwać kilka godzin, z powodu powolnego oziębiania się użytej masy wody, temperatura zaś może spaść do 30° a fosfor nie skrzepnie. Kawałek fosforu bezkształtnego, wrzucony wtedy do rurki, nie powoduje krzepnienia ciekłego fosforu, w niej zawartego, natomiast krzepnie on natychmiast po wprowadzeniu doń odrobiny fosforu zwykłego albo szklanej pałeczki, którą przedtem zetknięto z takim fosforem.

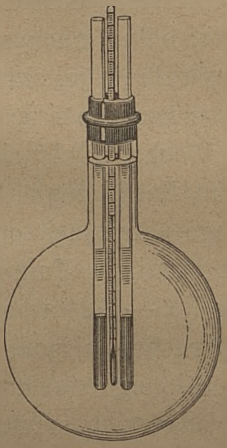


Fig. 415. Przyrząd Gernez'a.

Siarka przedstawia pod omawianym tutaj względem szczególnie ciekawe zjawisko. Ciało to topi się przy 115°, lecz mo-

żna je również utrzymać w stanie stopionym poniżej tej temperatury. Otóż jeżeli do ciekłej siarki, mającej temperaturę 110°, wprowadzimy oktaedryczny kryształ siarki, stopiona masa nie ulegnie zmianie stanu, to jest pozostanie ciekłą. Lecz gdy wrzucimy do niej kryształ pryzmatyczny, skrzepnie ona natychmiast, przyczem krzepnienie będzie rozchodziło się od wrzuconego kryształu po całej masie siarki. Wiadomo zaś, że poniżej 100° siarka krystalizuje w oktaedry, podczas gdy powyżej 100° jedynie możliwą formą krystaliczną jest pryzmat skośny.

Wprowadzenie stałej cząstki tego samego gatunku nie jest koniecznie potrzebne do wywołania skrzepnienia ciała, jeszcze ciekłego przy temperaturze niższej od jego temperatury topliwości. Pewien wpływ mechaniczny, jak tarcie pałeczki szklanej, opartej o dno naczynia i obracanej w cieczy, wystarcza w ogóle do wywołania jej skrzepnienia. Wiemy także, że nagły ruch nadany cieczy może spowodować ten sam rezultat.

W chwili gdy ciecz taka krzepnie, oswobadza się zawsze pewna ilość ciepła, które może doprowadzić ciało do temperatury jego normalnej topliwości. Gdy w przytoczonych wyżej doświadczeniach Fahrenheit'a, Gay-Lussac'a i innych, woda oziębiona do — 12° albo nawet do — 20°, nagle zamarzła, wtedy temperatura jej podniosła się do zera. Większa część normalnego utajonego ciepła topliwości zachowuje się tedy w takiej cieczy i oswobadza momentalnie przy jej zamarzaniu. Twierdzenie, że temperatury zamarzania i topliwości są identyczne nie zostaje więc wcale obalonem przez fakt, że ciało może pozostać ciekłem poniżej punktu topliwości, należy tylko pamiętać o tem, że temperaturą topliwości nazywamy tę temperaturę, jaką termometr, zanurzony w cieczy, wskazuje w chwili, gdy ona poczyna krzepnąć.

Woda, zawierająca rozpuszczoną sól, marznie przy niższej temperaturze, aniżeli czysta woda. Oprócz tego z roztworu solnego wydziela się pod postacią lodu tylko czysta woda, jak tego dowodzi znany fakt, że w zimnych miejscowościach poddają morską wodę, przeznaczoną do wydobywania soli, częściowemu zamarzaniu i otrzymują przez to roztwór bogatszy w sól. Rüdorff

dowiódł tego bezpośrednio za pomocą doświadczeń. Badał on także specyalnie zmiany temperatury zamarzania wody, zależne od natury rozpuszczonej soli oraz od jej ilości. Z licznych jego doświadczeń wynika, że wszystkie sole obniżają punkt zamarzania wody i że obniżenie to jest proporcyonalne do procentowej zawartości soli w roztworze, to jest do tej ilości, jaka przypada na 100 części wody.

Ciało rozpuszczone można napowrót przeprowadzić w stan stały, usuwając rozpuszczalnik za pomocą parowania. Można to osiągnąć także przez obniżanie temperatury, jeżeli dane ciało jest bardziej rozpuszczalne na gorąco, aniżeli na zimno. W jednym i w drugim wypadku roztwór może być doprowadzony do stanu nasycenia. Otóż jeżeli po osiągnięciu tego stanu dalej usuwamy rozpuszczalnik, albo też dalej oziębiamy, to—w razie gdy w roztworze znajduje się choćby jedna cząstka *stała* substancyi rozpuszczonej — ciało rozpuszczone zawsze poczyna krzepnąć i pozostała masa substancyi przechodzi w stan stały, zwykle pod postacią kryształów. W razie zaś gdy nie ma w roztworze stałej cząstki materyi rozpuszczonej, krzepnienie nie koniecznie następuje; dla bardzo znacznej ilości ciał, roztwór staje się wtedy tylko coraz bardziej stężonym i pomimo, że zawiera większą wagową ilość ciała od tej, jaka może się w nim rozpuścić przy tej samej temperaturze, to jednak zachowuje on to ciało w stanie ciekłym. Roztwór taki jest więcej niż nasycony. Roztwory wielu soli można z łatwością obserwować w stanie takiego nasycenia; pozostają one ciekłe w pewnych granicach temperatury, zależnych od rodzaju substancyi rozpuszczonej i rozpuszczalnika. W podobnych warunkach niezawodnym środkiem do wywołania skrzepnienia jest wprowadzenie do cieczy odrobiny tej samej substancyi, jaka się znajduje w roztworze albo nawet ciała mającego z nią analogiczną budowę chemiczną. Wprowadźmy do szklanej rurki, ostro zakończonej (fig, 416 str. 704), skoncentrowany i gorący wodny roztwór siarczanu sodu i gotujmy go w celu wypędzenia powietrza z rurki, następnie zalutujmy tę ostatnią za pomocą dmuchawki i pozwólmy jej się oziębić. Pomimo, że roztwór oziębia się do zwyklej temperatury i zawiera

więcej siarczanu sodu, niż może go się rozpuścić przy danej temperaturze, to jednak nic się w roztworze nie osadza. Lecz gdy po odłamaniu zalutowanego końca rurki wprowadzimy do niej minimalny chociażby kryształ siarczanu sodu, roztwór skrzepnie. Igiełki krystaliczne tworzą się z początku na swobodnej powierzchni cieczy, następnie krystalizacya obejmuje stopniowo całą jej masę. Jednocześnie także oswobadza się dużo ciepła. Często nie potrzeba nawet wprowadzać kryształu, który powoduje krzepnienie, gdyż powietrze, wchodząc do rurki, może także wywołać krystalizacyę roztworu, zawiera ono bowiem—jak tego dowiodły bezpośrednie badania Gernez'a—pyłki krystalicznego siarczanu sodu.

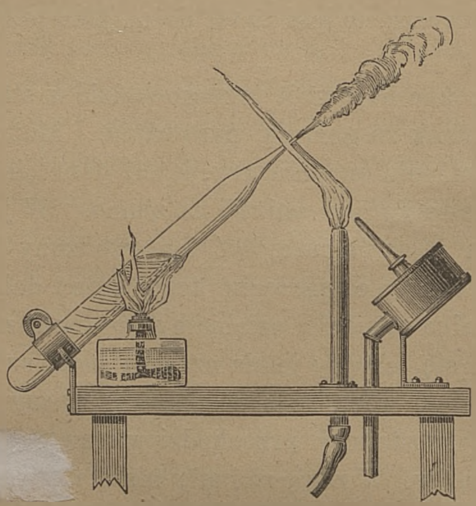


Fig. 416. Doświadczenie z roztworem.

Co do wpływu czynników mechanicznych na roztwory, o których mowa, większość tych ostatnich nie krzepnie pod ich działaniem, mniejszość zaś zachowuje się podobnie jak ciała ciekłe poniżej punktu topliwości. Do tej drugiej grupy należą naprzykład roztwory więcej niż nasycone chlorku wapnia, które wylane na szklaną tafelkę, jeszcze nie krystalizują, a krzepną dopiero wtedy, gdy tafelkę tę potrze się dość żywo miedzianą naprzykład pałeczką.

Dodajmy wreszcie, że dostateczne obniżenie temperatury powoduje krzepnienie wszystkich podobnych roztworów. I tak np. roztwór więcej niż nasycony octanu ołowiu, który zachowuje się bez zmiany przy 15°, zaczyna krzepnąć po oziębieniu, za pomocą lodu, jednego punktu naczynia, zawierającego tenże roztwór; pierwszy kryształ, który się wtedy tworzy, powoduje skrzepnienie całej masy.

Roznosiciele mają Prospekty i Zeszyty na okaz!

Дозволено Цензурою, Варшава 21 Апрѣля 1889 г.

Druk Jana Cotty w Warszawie, Senatorska 29.